

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA TEXTILNÍCH A JEDNOÚČELOVÝCH STROJŮ

2013

Ondřej Bařka

Studijní program B2314 – strojírenství

Stavba strojů

Konstrukce rotoru s výkyvnými kyvetami u přístroje pro medicínskou diagnostiku

Construction of rotor with swinging cuvettes for medicine diagnostic device

KTS-B067

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.

Rozsah práce

Počet stran: 45

Počet obrázků: 47

Počet grafů: 1

Počet příloh: 7

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Ondřej Baťka**
Studijní program B 2341 Strojírenství
Obor **2302 R022** Stroje a zařízení
Zaměření Stavba strojů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Konstrukce rotoru s výkyvnými kyvetami u přístroje pro medicínskou diagnostiku.

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce doporučené metody pro vypracování)

1. Rešerše rotorů používaných u medicínských diagnostických přístrojů.
2. Návrh rotoru s výkyvnými kyvetami.
3. Pevnostní a deformační optimalizace rotoru.
4. Výkresová dokumentace navrženého rotoru. Podle možností ověření navržené konstrukce na funkčním modelu přístroje.



Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva: **30 stran formát A4**
- grafické práce: **Výkresová dokumentace rotoru. Průběhy napětí a deformací rotoru.**

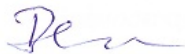
Seznam literatury (uvedte doporučenou odbornou literaturu):

Gash, R. – Pfützner, H.: Dynamika rotorů. SNTL, Praha 1989.

Slavík, J. – Stejskal, V. – Zeman, V.: Základy dynamiky strojů. ČVUT. Praha 1997.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.**

Konzultant bakalářské práce: **doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.**



prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan FS

V Liberci dne 19. 11. 2012

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.



Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí rotoru u laboratorní centrifugy určené pro medicínskou diagnostiku. Podstatou práce je návrh rotoru s kyvetami, které jsou rotačně uloženy, což umožňuje jejich kyvný pohyb a zajišťuje vodorovnou polohu při odstředění. Důležitým kritériem je požadované odstředivé zrychlení při daných otáčkách rotoru. Vzhledem k vysokému provoznímu zatížení rotoru je třeba podrobit konstrukci pevnostní analýze pomocí metody konečných prvků prostřednictvím softwaru Pro/Mechanica. Závěr se zabývá, modální analýzou, návrhem uložení rotoru na hřídel servopohonu a vyhodnocením získaného odstředivého zrychlení.

Klíčová slova

Konstrukce, rotor, analýza, kyveta, zrychlení

Anotation

This thesis deals with the construction of rotor for laboratory medical diagnostic centrifuge. The task is to design rotor with rotationally fixed cuvettes which allows them swinging movement and at the same time fixes them in horizontal position during centrifugation. Important criterion is required centrifugal acceleration depending on given rotor speed. Due to the high rotor working load, the construction needs to be subjected to the stress analysis using the finite element method software Pro/Mechanica. Conclusion of the thesis deals with modal analysis and design of rotor imposition on the actuator's shaft. Acquired centrifugal acceleration is discussed.

Key words

Construction, rotor, analysis, cuvette, acceleration

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu bakalářské práce prof. ing. Jaroslavu Beranovi, CSc. za odborné vedení a užitečné rady. Děkuji katedře textilních a jednoúčelových strojů za poskytnutí výkonné počítačové laboratoře a také Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci a jejím katedrám za poskytnutí cenných odborných informací po celou dobu mého studia. V neposlední řadě děkuji pracovníkům studijního oddělení za poskytování informací a trpělivý dohled nad plněním mého studijního plánu.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of
Consultation with the head of thesis and consultant

Date

Signature

OBSAH

Seznam zkratk a symbolů	7
Úvod	8
1. Obecná teorie centrifug	9
1.1 Základní pojmy a principy	9
1.1.1 Centrifugace	9
1.1.2 Odstředivé zrychlení	12
1.1.3 Sedimentační rychlost	12
1.1.4 Sedimentační koeficient	12
1.1.5 Relativní odstředivé zrychlení	13
1.2 Laboratorní centrifugy	14
1.2.1 Rozdělení centrifug	14
1.2.2 Typy rotorů	15
2. Analýza účinku odstředivého zrychlení	20
3. Konstrukční návrh	22
3.1 Prvotní návrh	23
3.2 Návrh rotoru s kyvetami pod úhlem 45°	24
3.2.1 Varianta 1	24
3.2.2 Varianta 2	26
3.3 Návrh rotoru se svislou polohou kyvet	28
3.4 Modifikace žebra a objímky	31
3.5 Finální konstrukce rotoru	34
3.5.2 Analýza horní desky	35
3.5.1 Deformační analýza	35
4 Modální analýza	37
5 Návrh svěrného pouzdra	40
6. Získané odstředivé zrychlení	42
Závěr	43
Použité zdroje	44
Seznam příloh	45

Seznam zkratk a symbolů

symbol	název	jednotka
a	odstředivé zrychlení	m/s^2
r	poloměr	mm
ω	úhlová rychlost	s^{-1}
v	sedimentační rychlost	m/s
ρ	hustota	kg/m^3
m	hmotnot	kg
f	třecí součinitel	[-]
RPM	otáčky	min^{-1}
RCF	relativní odstředivé zrychlení	[-]
g	gravitační zrychlení	m/s^2
W	vlastní frekvence	Hz
k	tuhost	N/m
t	čas	s
α	úhlové zrychlení	s^{-2}
I	moment setrvačnosti	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
M_k	krouticí moment	Nm
D	průměr	mm
σ_{02}	mez průtažnosti	MPa
C	faktor pro svěrné pouzdro	[-]
Pn	tlak na náboji	MPa

Úvod

Úkolem této práce je navrhnout optimální řešení konstrukce rotoru laboratorní centrifugy určené pro přípravu krevního vzorku k testování DNA. Jedná se o unikátní přístroj, vyvíjený na Katedře textilních a jednoúčelových strojů. Výjimečnost tohoto přístroje spočívá ve sloučení několika operací, což vede k zefektivnění celého procesu separace potřebných krevních složek. Kromě odstředění dochází během provozu k automatickému vyměňování podpůrných chemických látek, potřebných pro separaci DNA, v unikátní vícesegmentové kartuši, která byla na katedře vyvinuta. Tato kartuše se vkládá do kyvety, umístěné na rotoru. Podstatou řešení je rotační uložení kyvet na rotoru, což jim umožňuje dosažení vodorovné polohy během centrifugace.

Účelem nového řešení rotoru je zvýšení odstředivého zrychlení působícího na vzorek za účelem zefektivnění procesu separace. Současný rotor, který je testován, je konstruován s kyvetami uloženými fixně odkloněnými o úhel 45° od osy rotace. Díky tomu není pro centrifugaci plně využito odstředivé zrychlení a je využito pouze ze 70 procent. Konstrukce s výkyvnými kyvetami by měla nabídnout stoprocentní využití odstředivého zrychlení pro proces separace.

Nedílnou součástí návrhu je deformační a pevnostní analýza, která specifikuje pevnostně slabá místa, což slouží k jejich následné optimalizaci. Pro analýzu byla použita metoda konečných prvků pomocí programového nástroje Pro/Mechanica. Celá koncepce rotoru byla navrhována podle všech zadaných kritérií s ohledem na jednoduchost a ekonomičnost výroby a následné montáže.

1. Obecná teorie centrifug

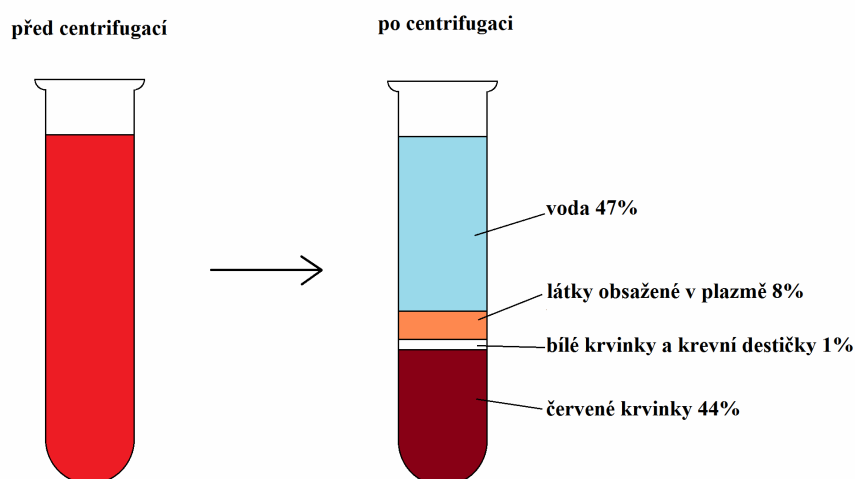
Centrifuga je obecně přístroj, který využívá působení odstředivé síly, vzniklé při rotačním pohybu rotoru, na němž zpravidla bývají umístěné různé prvky, vzdálené od osy rotace o určenou vzdálenost. Stroje využívající odstředivé síly mají široké použití v mnoha vědních i společenských oborech. Nejrozšířenější příklad použití je ve ždímačkách, určených k odstranění vody ze tkanin po jejich předchozím praní. Další aplikace můžeme nalézt v potravinářství, konkrétně v mlékárenství k oddělení smetany od mléka. V průmyslu nalézá uplatnění například při separaci uranu po jeho těžbě, nebo v čističkách odpadních vod. V neposlední řadě je princip centrifugy hojně využíván v medicíně v diagnostických laboratořích pro separaci jednotlivých krevních složek.

1.1 Základní pojmy a principy

Pro popis problematiky centrifug je třeba stanovit důležité pojmy, které jsou používány v této oblasti a základní principy, na nichž centrifugy fungují a postupy s nimiž pracují.

1.1.1 Centrifugace

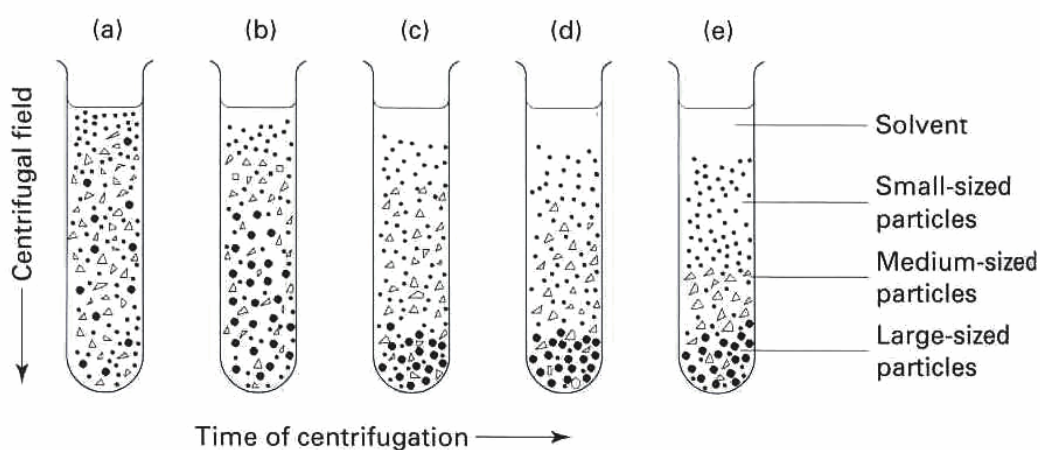
Centrifugace je proces využívající odstředivou sílu k separaci kapalných, plynných či pevných fází ze směsí na základě hustoty, velikosti nebo tvaru jednotlivých částic. Podstatou procesu centrifugace je urychlení přirozené sedimentace, která využívá pouze zrychlení gravitačního. V případě krevní sedimentace dochází k oddělení plazmy, krevních destiček a červených krvinek, obr. 1.



Obr. 1 sedimentace krve

Preparativní centrifugace diferenční

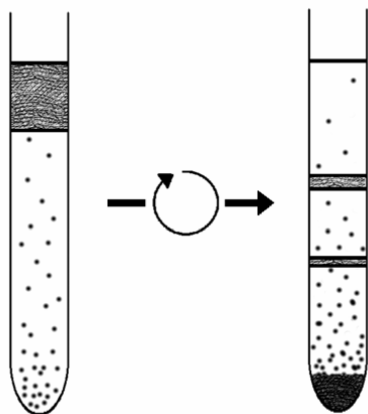
Při diferenční (diferenciální) centrifugaci dochází při postupném zvyšování rychlosti rotoru k oddělování kapalně fáze roztoku a přesouvání větších částic na dno kyvety. Menší a lehčí částice zůstávají v roztoku, který je homogenní a má menší hustotu než vzorek, viz obr 2.



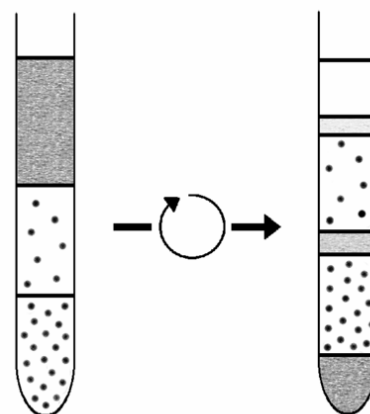
obr. 2 diferenční centrifugace [1]

Preparativní centrifugace gradientová

Funguje na principu různého gradientu hustoty. V různé vzdálenosti od dna kyvety je různá hustota media. Rozlišujeme centrifugaci kontinuální, kdy se v kyvetě mění gradient hustoty plynule (obr. 3) a centrifugaci diskontinuální, při které jsou na sebe navrstveny roztoky o různých hustotách, obr.4.



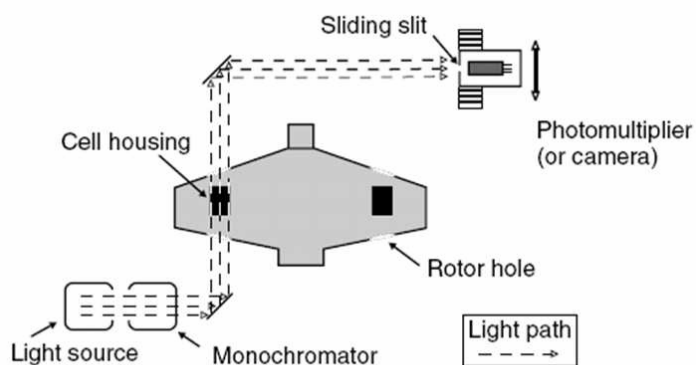
obr. 3 kontinuální centrifugace [2]



obr. 4 diskontinuální centrifugace [2]

Analytická centrifugace

Pomocí analytické centrifugace se měří fyzikální vlastnosti sedimentujících částic. Pro tuto aplikaci se používají ultracentrifugy, viz 1.2.1. Během centrifugace dochází ke snímání roztoku v kyvetě pomocí světelného paprsku a optického systému ke sledování částic a měření absorpce, či zákalu (obr. 5). Průběh je vyhodnocován pomocí PC.



obr. 5 analytická centrifugace [3]

1.1.2 Odstředivé zrychlení

Odstředivé zrychlení a , respektive odstředivá síla, je hlavní podstatou principu centrifugy. Jedná se o setrvačnou sílu, která působí na těleso v neinerciální vztažné soustavě. Vzniká při rotaci tělesa na určitém rameni a je závislá na délce ramene a na druhé mocnině otáček rotoru.

$$a = r \cdot \omega^2 \quad (1.1)$$

r ... vzdálenost určitého bodu na kyvetě

ω ... úhlová rychlost

1.1.3 Sedimentační rychlost

Sedimentační rychlost v je rychlost, kterou probíhá usazování částic. Od této rychlosti se odvíjí čas potřebný pro úspěšnou centrifugaci.

$$v = m \cdot g \cdot \frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_M}\right)}{f} \quad (1.2)$$

m ... hmotnost částice

ρ ... hustota částice

ρ_M ... hustota média

f ... třecí součinitel [4]

1.1.4 Sedimentační koeficient

Sedimentační koeficient určuje rychlost sedimentace určité částice. Je závislý na hustotě velikosti a tvaru částice. Jednotka se nazývá Svedberg [s]

$$S = \frac{v}{r \cdot \omega^2} \quad (1.3) \quad [4]$$

1.1.5 Relativní odstředivé zrychlení

Veličina relativní odstředivé zrychlení RCF udává, kolikrát je zrychlení při centrifugaci větší, než zrychlení gravitační. Podle požadovaného RCF se volí počet otáček rotoru. Pro přepočet RCF na RPM slouží například normogram na obr. 6

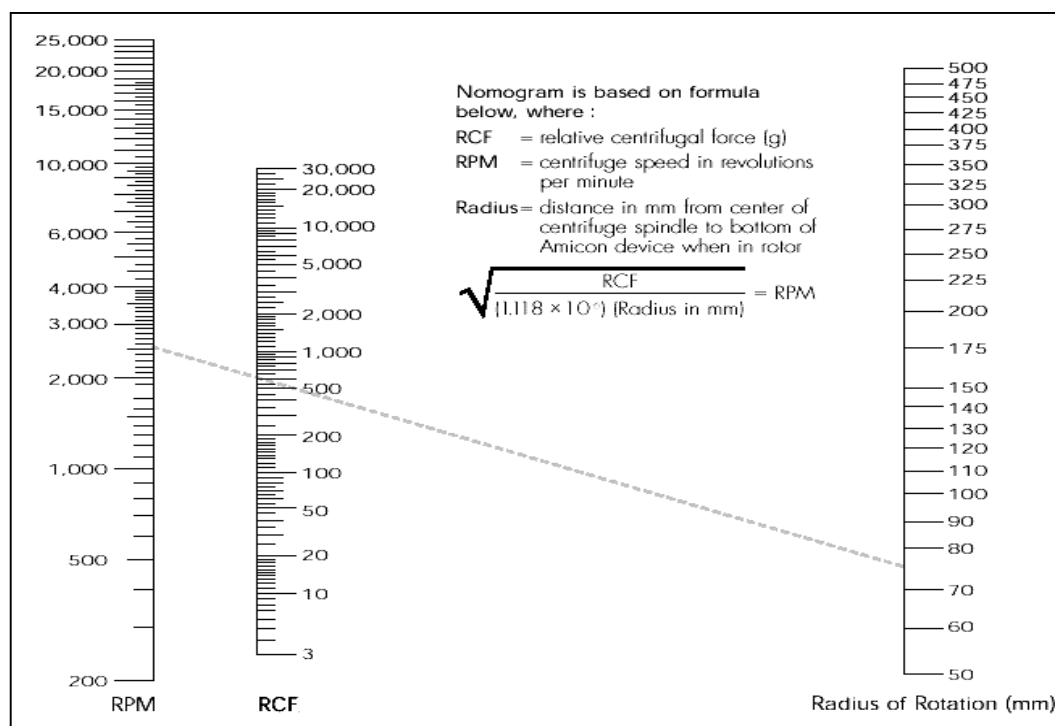
$$RCF = \frac{\omega^2 \cdot r}{g} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r \cdot n^2}{3600 \cdot g} \quad (1.4)$$

n ... otáčky rotoru [min^{-1}]

r ... poloměr otáčení

g ... gravitační zrychlení

[4]



obr. 6 normogram [5]

1.2 Laboratorní centrifugy

Laboratorní centrifugy jsou důležitou součástí při analyzování vzorků krve a jejích složek, odebrání krevní plazmy, testování DNA a mnoha dalších medicínských analýz. Jejich úlohou je spolehlivé zajištění procesu centrifugace. Laboratorní centrifugy jsou kompaktní přístroje, jejichž podstatou je otáčející se rotor, který má na svém obvodu rozmístěné kyvety, do nichž se vkládají jednotlivé vzorky, určené pro odstředění. Kyvety mohou být na rotoru uloženy různými způsoby. Rotory během provozu rotují kolem své osy vysokými otáčkami, dle typu centrifugy v řádech tisíců až desetitisíců rpm. Rotor centrifugy je během provozu namáhán vysokým zatížením, vzniklým odstředivými silami a je nutné jeho dokonalé vyvážení, aby nedocházelo k vibracím během provozu přístroje.

Z důvodu vysokého namáhání jsou rotory vyrobeny ze speciálních slitin, které mají vysokou pevnost a nízkou měrnou hmotnost. U centrifug, které pracují na velmi vysokých otáčkách, dochází k ohřívání rotoru, které je způsobeno odporem okolního vzduchu. Toto teplo je třeba odvádět dostatečným chlazením.

1.2.1 Rozdělení centrifug

Centrifugy pro malé objemy

Běžná laboratorní vyšetření, například sedimentace krve

Objemy 30 – 50 ml

Zrychlení 3000 – 7000g [1]

Velkoobjemové centrifugy

Objem až 6 litrů

Zrychlení 6500g [1]

Vysokootáčkové centrifugy

Rotor dosahuje otáček o hodnotě až 25000 rpm

Zrychlení 60000g [1]

Ultracentrifugy

Používají se pro speciální aplikace, rotor dosahuje otáček až 90000 rpm. Centrifugy je třeba chladit a rotor musí být ve vakuu, aby se docílilo snížení odporu prostředí.

Zrychlení 600000g

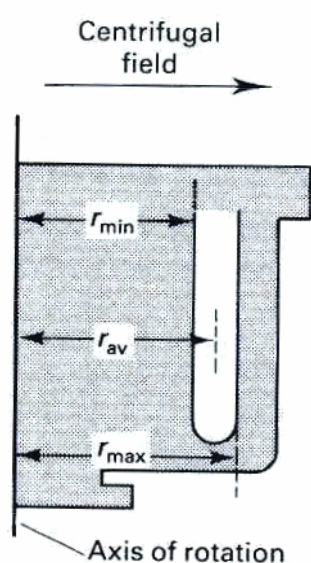
[1]

1.2.2 Typy rotorů

Rotor se svislými kyvetami

Kyvety jsou na rotoru uloženy rovnoběžně s osou rotace, schéma na obrázku 6. Výhodou jsou jeho malé rozměry, konkrétně malá vzdálenost kyvet od osy, díky čemuž jsou odstředivé síly nižší a je možné provozovat rotor na vysokých otáčkách. Další výhodou je krátká sedimentační dráha, což ve výsledku zvyšuje sedimentační rychlost a snižuje tak dobu sedimentace. Nevýhoda této konstrukce je nepoužitelnost pro aplikace, kde je potřebná dráha sedimentace vzorku ve směru osy kyvety. V tomto směru nepůsobí odstředivá síla a k centrifugaci tak nedochází. Příklad konkrétní konstrukce na obr. 7.

[1]



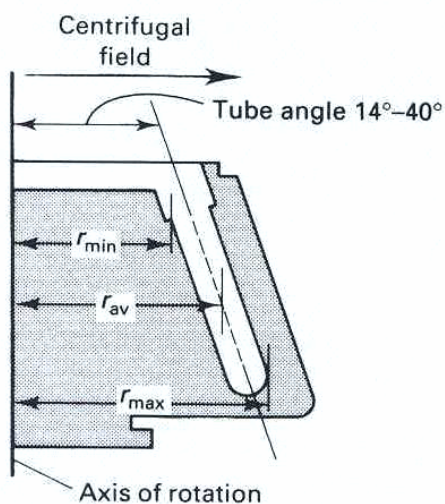
Obr 6 schéma rotoru [1]



Obr 7 svislý rotor [6]

Rotor s fixním úhlem kyvet

Kyvety jsou na rotoru uloženy pod určitým úhlem od osy rotace (obr. 9 a 10), zpravidla od 15 do 45°. Výhody jsou obdobné jako u rotorů s vertikálními kyvetami, konstrukce je také malých rozměrů a velmi tuhá a dovoluje provoz rotoru při vysokých otáčkách. Rozdílem oproti vertikálním rotorům je možnost využít působení odstředivé síly i ve směru osy kyvety. V tomto směru působí sinová složka odstředivé síly, která se zvyšuje s velikostí úhlu odklonu. Aby nedošlo k vytečení, musí být kyvety zajištěny krytem. Tento typ rotoru lze použít jak pro diferenciální centrifugaci, při které dosahuje kratší doby, která je potřebná pro centrifugaci, tak pro centrifugaci gradientovou. [1]



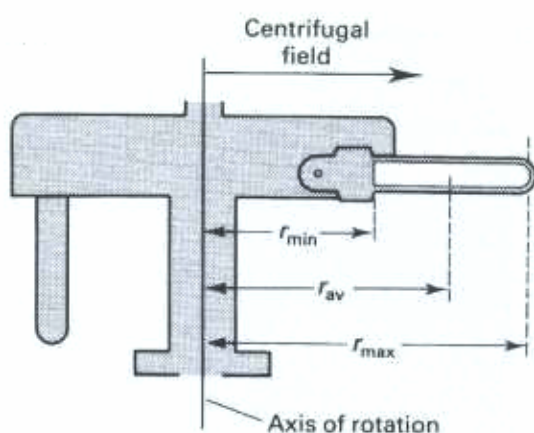
obr 9 schéma rotoru [1]



obr 10 šikmý rotor [4]

Rotor s výkyvnými kyvetami

Kyvety jsou uloženy rotačně na čepu (obr. 11 a 12) a vlivem odstředivé síly dochází při centrifugaci k jejich natočení do polohy kolmé k ose rotace. Tato konstrukce nabízí sto procentní využití odstředivé síly ve směru osy kyvety, díky čemuž dochází ke kvalitnější centrifugaci. Lze sedimentovat i částice menších rozměrů. Sedimentační dráha je delší, což prodlužuje čas potřebný pro úplnou sedimentaci. Slabina této konstrukce je vysoké silové namáhání otočného čepu, což představuje limit pro provozní otáčky. [6]



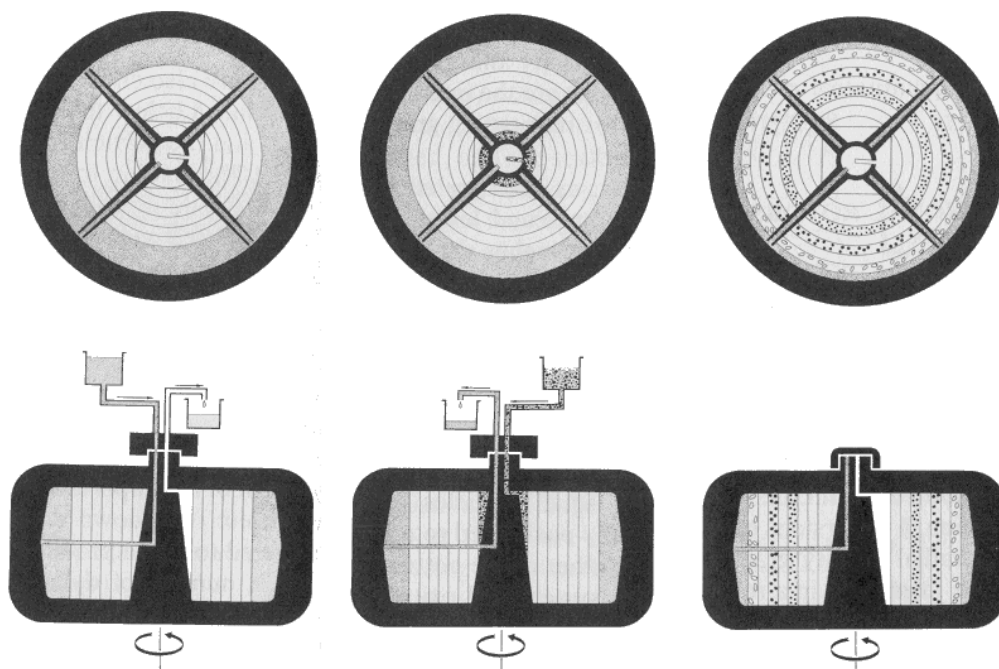
obr 11 schéma rotoru [1]



obr 12 výkyvný rotor [6]

Zonální rotor

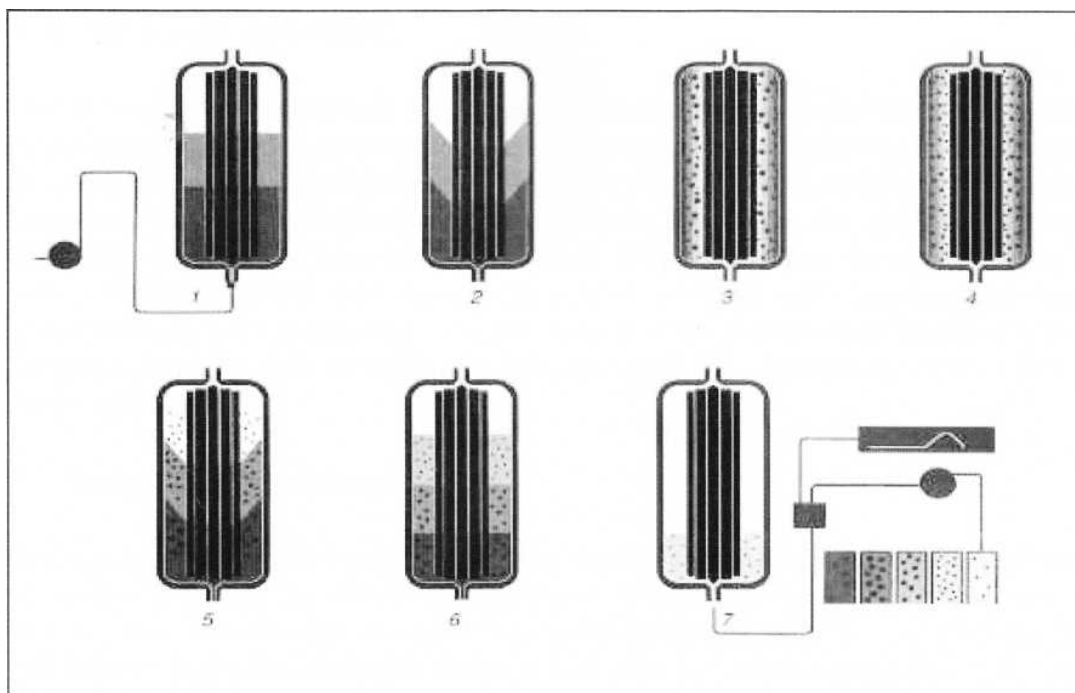
Používá se pro gradientovou centrifugaci velkých objemů. Využívá se celá dutina rotoru pro plnění a vyprazdňování kanálků během jeho chodu. Dochází tak k zabraňování promíchání hustotního gradientu. Princip je vyobrazen na obr. 13. [6]



obr 13 zonální rotor [6]

Reograd

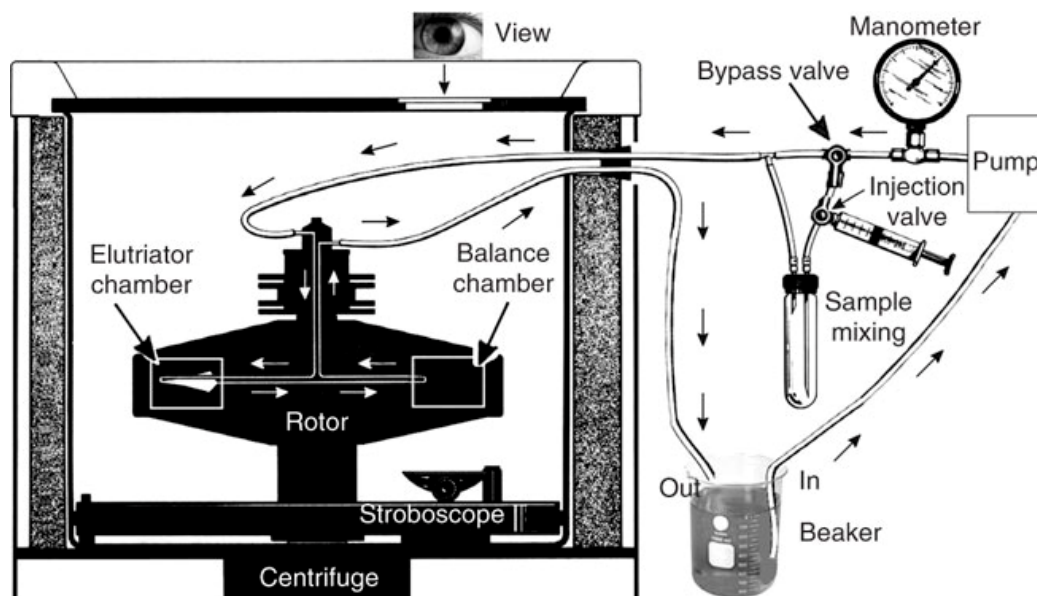
Principiálně funguje obdobně jako rotor vertikální, konstrukčním provedením je podobný zonálnímu rotoru (obr.14). Rozdíl je však v odlišném plnění a vyprazdňování než u zonálního rotoru. Dochází k němu staticky a zrychlení začíná až po úplném naplnění. Aby nedocházelo k promíchání jednotlivých gradientů, probíhá zrychlování a zpomalování s pomalejším náběhem. [6]



obr 14 reograd [6]

Elutriátor

Elutriátor (obr. 15) je speciální typ rotoru, který má konický separační prostor. Do tohoto prostoru je vháněn vzorek, který proudí proti směru sedimentace částic. Vytváří se tak průtokový rychlostní gradient a částice jsou zastavovány v místech rovnováhy rychlosti sedimentační a rychlosti průtokové. Důsledkem toho nedochází u stěny zkumavky k sedimentaci částic. [6]

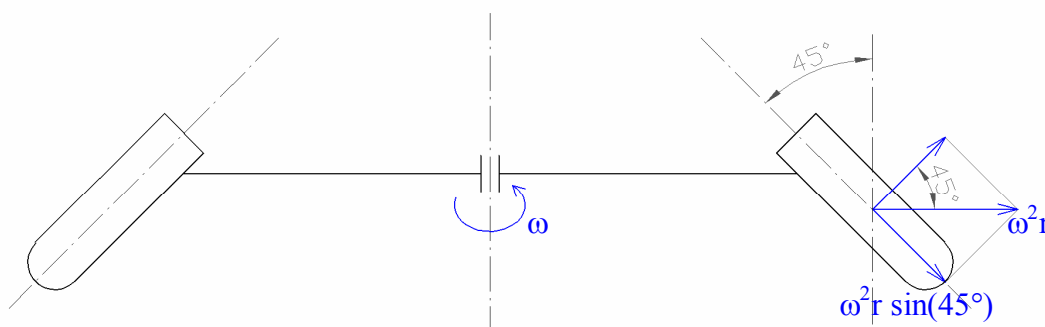


obr 15 elutriátor [7]

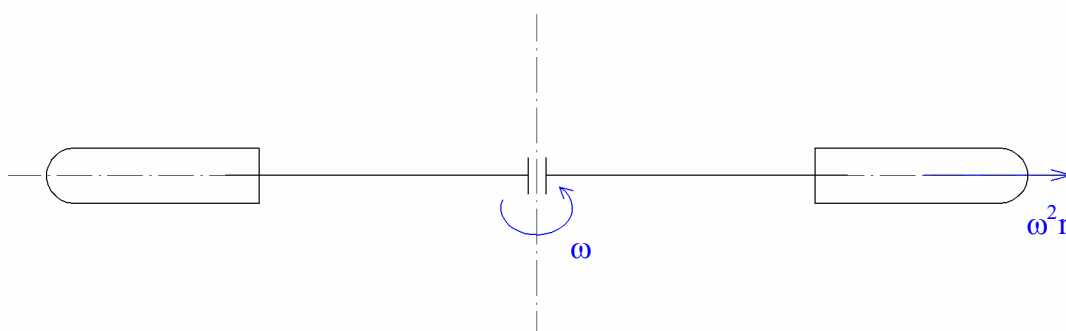
2. Analýza účinku odstředivého zrychlení

Základním požadavkem pro konstrukci rotoru je dosáhnout stoprocentního využití účinku odstředivé síly pro fázi centrifugace. K odstředění vzorku v kartuši dochází ve směru její osy a požadované odstředivé zrychlení působící na vzorek v určitém místě kartuše by mělo dosahovat maximální možné hodnoty.

Stávající prototyp rotoru využívá konstrukci se šikmými kyvetami, fixně uloženými pod úhlem 45° od osy rotace. Z tohoto důvodu je využito jen 70 procent odstředivé síly, neboť jak ukazuje obrázek 16, ve směru osy kyvety působí pouze složka odstředivé síly, která odpovídá sinu úhlu, jenž osa kyvety svírá s osou rotoru. Stoprocentního využití účinku odstředivé síly by bylo možné dosáhnout v případě, kdy by osa kyvety byla kolmá na osu rotoru, tudíž kyveta by byla ve vodorovné poloze, viz obrázek 17.



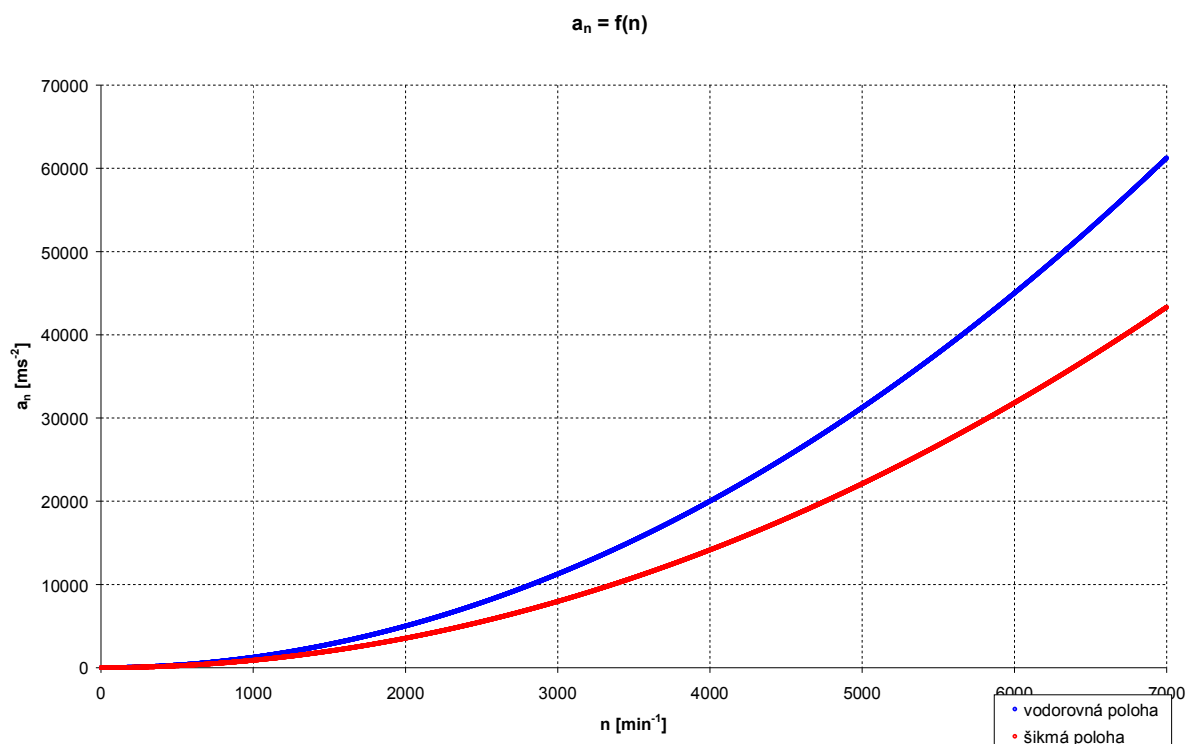
Obr 16 kyvety v šikmé poloze



Obr 17 kyvety ve vodorovné poloze

Graf č.1 ukazuje závislost zrychlení na otáčkách rotoru pro určené místo na kyvetě ve vzdálenosti 114 milimetrů od osy rotoru. Červená křivka znázorňuje závislost zrychlení u rotoru se šikmo uloženými kyvetami, modrá je závislost zrychlení při vodorovné poloze kyvety. Z grafu 1 je patrné, že díky vodorovné poloze lze při

provozní rychlosti 5000 otáček za minutu dosáhnout zvýšení účinku odstředivé síly o 41 % oproti poloze šikmé.



graf 1 závislost zrychlení na otáčkách

Současné typy výkyvných rotorů nesplňují geometrické a funkční požadavky pro nově vyvinutý typ kartuše. Proto je třeba hledat nové řešení.

3. Konstrukční návrh

Návrh konstrukce rotoru byl proveden na základě požadovaných kritérií. Rotor by měl nahradit stávající konstrukci, která je provedena jako rotor se šikmým uložením osmi kyvet. Nová koncepce rotoru by měla odpovídat geometrickým parametrům stávající konstrukce centrifugy.

Konstrukce byla provedena jako prototyp pro testování a měla by tedy být snadno modifikovatelná, tudíž aby umožňovala jednoduchou montáž a demontáž podle potřeby. Z tohoto důvodu nelze uvažovat o konstrukci formou odlitku, rovněž by bylo třeba omezit technologii svařování pro spojení jednotlivých částí. Svařování s sebou také přináší nevýhodu v podobě negativního tepelného ovlivnění materiálu a následně jeho mechanických vlastností.

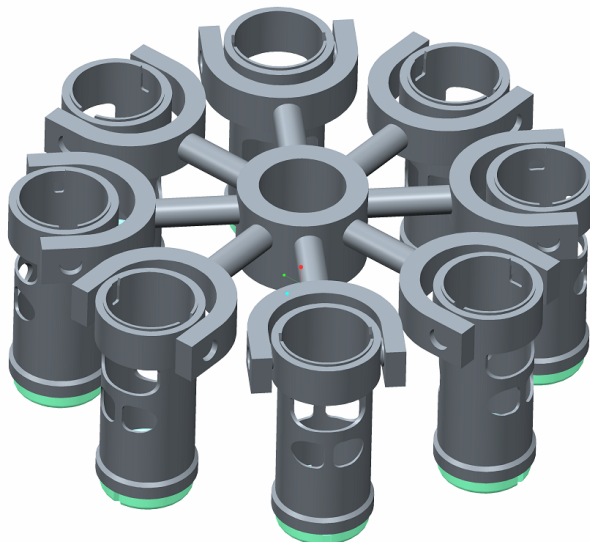
Jako konstrukční materiál byl použit vysokopevnostní dural se smluvní mezí kluzu 290MPa. Dural má oproti oceli třikrát menší měrnou hmotnost, takže dochází k menšímu zatížení rotoru odstředivými silami. Vzhledem k požadované bezpečnosti bylo zvoleno maximální dovolené namáhání 190 MPa. Snahou byla optimalizace maximálního namáhání kritických míst pod tuto hranici.

Jak již bylo nastíněno v úvodu, přístroj pro který byl rotor navrhován, slučuje několik operací v rámci technologie přípravy krevního vzorku. Probíhá tak v několika krocích. Podstatou je, že vždy po dokončení jedné fáze centrifugace dochází k pootočení části kartuše v kyvetě pomocí mechanismu s ozubeným kolem. Tento mechanismus se přiblíží ke kartuši, dojde tak k záběru ozubeného kola na tomto mechanismu a na kartuši, což s sebou přináší přitlačnou sílu, působící kolmo na kartuši. Vzhledem k tomu, že kyvety jsou na rotoru uloženy výkyvně na otočném čepu, tuto sílu je potřeba zachytit pomocí podpory. Bez této podpory by měla kyveta jeden stupeň volnosti a nebylo by možné docílit požadovaného pootočení.

Během postupu navrhování a analyzování bylo vytvořeno celkem pět variant konstrukce, z nichž některé byly klasifikovány jako nevyhovující z důvodu různých nevýhod a omezení. Všechny tyto varianty budou dále podrobně popsány.

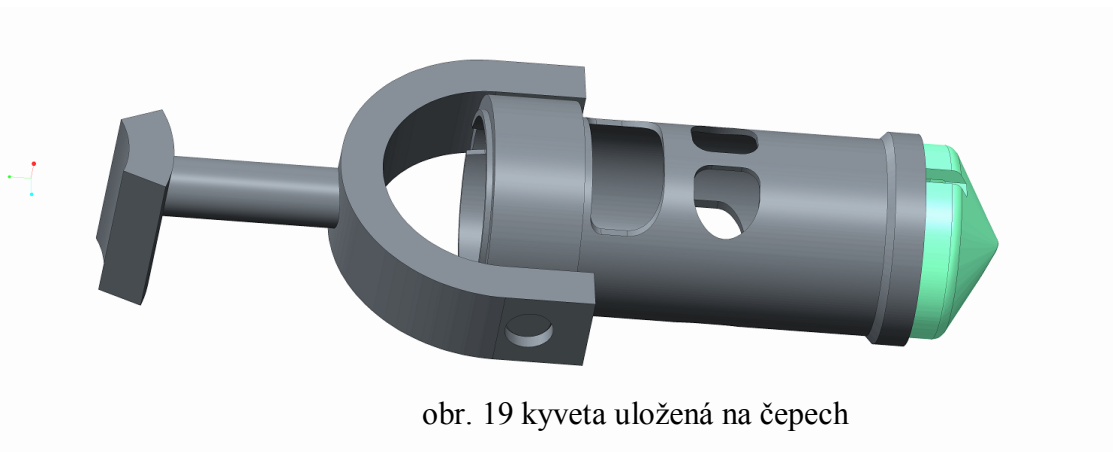
3.1 Prvotní návrh

Prvotní koncept na obrázku 16 představuje základní myšlenku uložení osmi kyvet na rotoru, které jsou vsazeny do vidlic pomocí čepů.



obr 18 konstrukce rotoru

Samotná kyveta na obrázku 19 je tvořena z objímky a dvoudílné trubky, která byla převzata ze současného prototypu rotoru a je již navržena pro snadné vložení kartuše. Objímka je opatřena dírami pro uložení čepů, na kterých se kyveta otáčí.



obr. 19 kyveta uložená na čepech

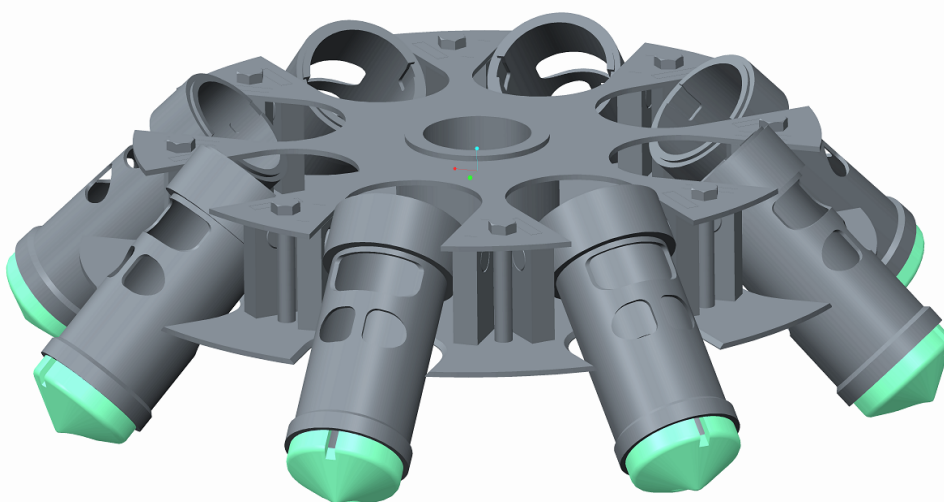
Tento koncept má mnoho nevýhod a to v první řadě absence podpory pro statické uchycení kyvety při otáčení kartuše. Tato podpora by představovala hmotu navíc, což by vedlo k vyššímu zatížení rotoru. Další nevýhodou je poměrně složitá výroba, kdy by bylo pravděpodobně nutné vyrobit rotor jako odlitek, což neodpovídá požadavku na jednoduchou montáž a demontáž. Z těchto důvodů byl tento návrh shledán jako nevyhovující, nebyl dál rozvíjen a bylo hledáno jiné řešení.

3.2 Návrh rotoru s kyvetami pod úhlem 45°

Tento návrh rotoru částečně vychází ze stávající konstrukce s pevným uložením kyvet pod úhlem 45° s tím rozdílem, že pevné uložení je nahrazeno uložením na čepech. Jedná se o řešení pomocí dvou tenkých desek, upevněných na náboji, po jejichž obvodu jsou kyvety rozmístěny. Tato varianta byla navržena z důvodu, že současná konstrukce mechanismu, který pootáčí kartuši, je navržena pro tento úhel kyvet, tudíž by nebylo nutné mechanismus nijak modifikovat. Celkem byly testovány dvě varianty takovéto konstrukce.

3.2.1 Varianta 1

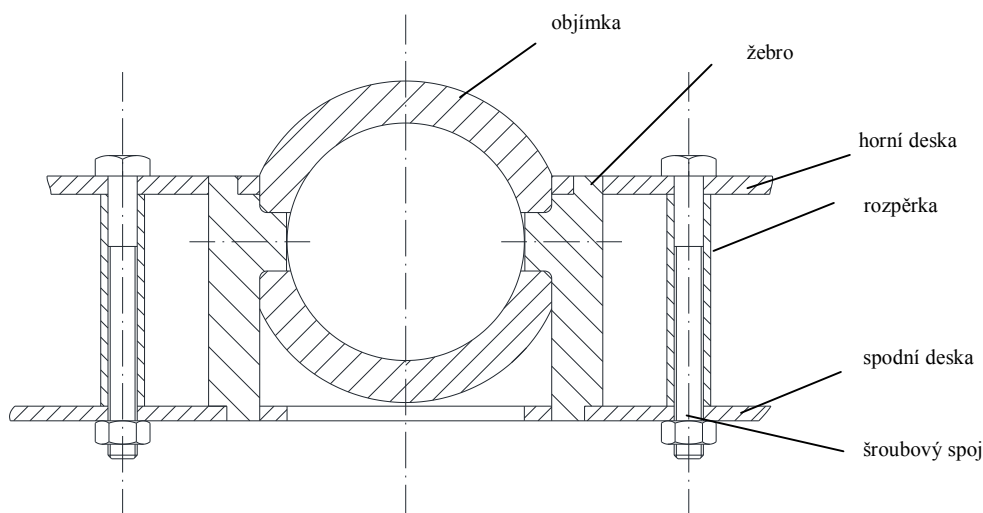
Rotor vyobrazený na obrázku 20 je tvořen dvěma deskami na náboji, po jejichž obvodu jsou rozmístěny kyvety, uložené mezi dvěma žebry.



obr. 20 varianta 1

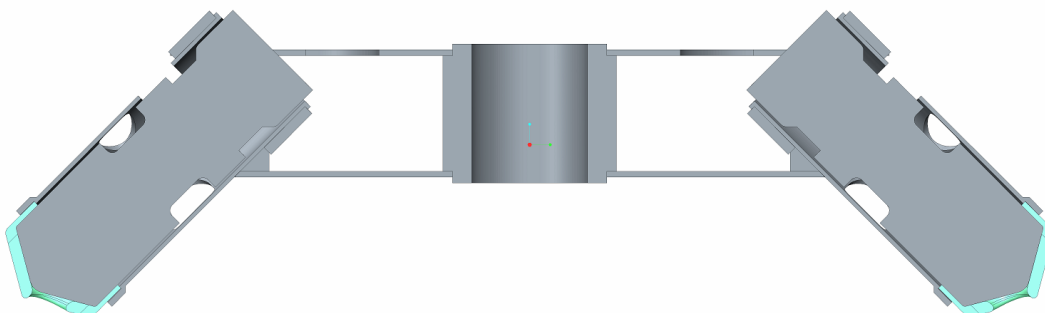
Tato žebra jsou opatřena čepy, které jsou nasunuty do otvorů v objímce na kyvetě, viz obr. 21. Požadované opření kyvety za účelem zajištění stability při pootáčení je zajištěno pomocí spodní desky rotoru, na které je za klidu kyveta položena.

Desky rotoru opatřeny otvory, do kterých jsou žebra zasazena a mezi sousedními kyvetami jsou šroubové spoje, které k žebřům obě desky přitlačují. Tímto spojením jsou žebra pevně uchycena na rotoru, viz obr. 21. Toto řešení umožňuje jednoduchou montáž a demontáž všech částí rotoru.



obr. 21 uložení kyvety

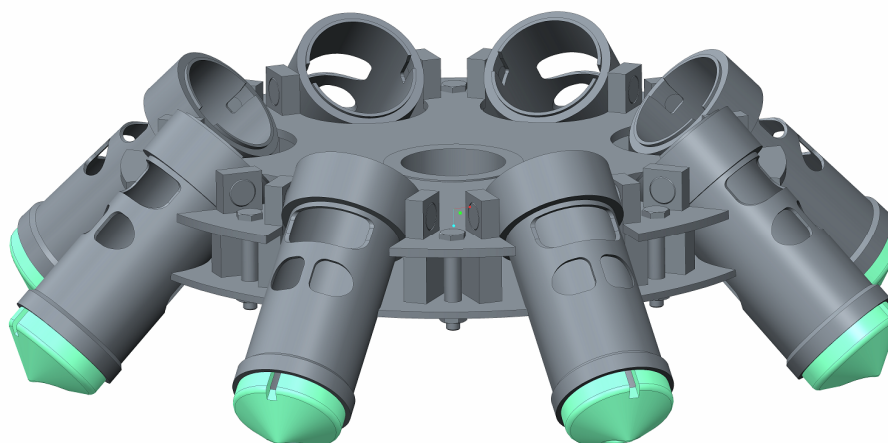
Jak je patrné z obrázků 20 a 21, otočné čepy jsou u této varianty umístěny mezi deskami rotoru, což sebou přináší v případě počátečního úhlu 45° komplikaci při vyjímání kartuše z kyvety. Na obrázku 22 lze pozorovat, že vršek kartuše se nachází pod úrovní horní desky, což s sebou přináší zhoršený manipulační prostor pro obsluhu stroje, neboť tomu horní deska brání a kartuši by tak bylo možné vysunout jen velmi obtížně, případně pomocí nějakého přípravku. Z tohoto důvodu konstrukce není optimální a proto bylo hledáno jiné řešení.



obr. 22 průřez rotorem

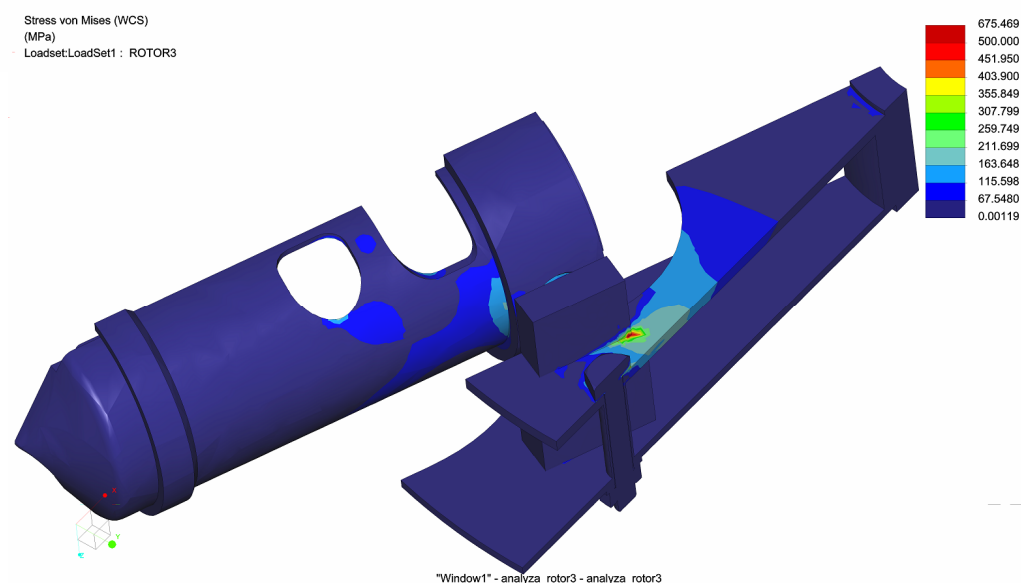
3.2.2 Varianta 2

Tato konstrukce vychází z předchozí varianty. Žebro a otvory v horní desce byly upraveny a otočné čepy byly umístěny nad horní desku. Toto řešení eliminuje problém s nedostatkem manipulačního prostoru pro vložení a vyjmutí kyvety. Vršek kyvety vystupuje nad úroveň horní desky (obr. 23), díky čemuž je možná bezproblémová manipulace s kartuší.



Obr. 23 konstrukce rotoru

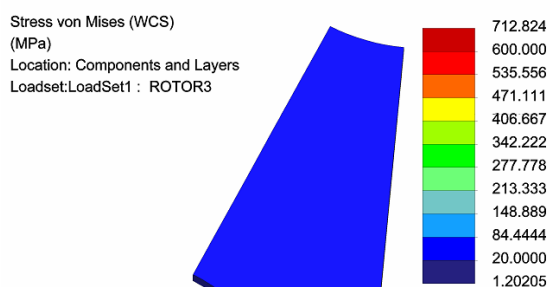
Tato varianta se z tohoto hlediska jeví jako vyhovující. Nedostatky však prokázala napěťová analýza rotoru, provedená metodou konečných prvků pomocí programu Pro/Mechanika.



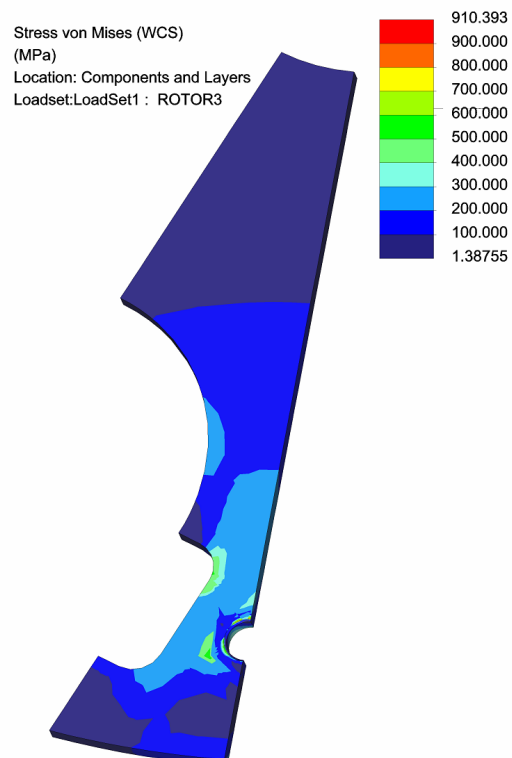
obr. 24 napěťová analýza

Vzhledem k symetrii modelu byla analyzována šestnáctina modelu za účelem zkrácení výpočetního času. Součástí výpočetního modelu byla i zjednodušená, tvarově odpovídající kartuše, které byly importovány hmotové parametry kartuše skutečné.

Snímek z výsledku napěťové analýzy (obr. 24) specifikuje slabé místo konstrukce. Jedná se o horní desku, která je velmi namáhána odstředivou silou, jež působí na kyvetu a následně na desky rotoru, přičemž spodní deska se na zachycení této síly příliš nepodílí, naopak se zde uplatňuje princip páky a spodní deska tak zvyšuje účinek odstředivé síly na horní desku. Velkým problémem je také otvor pro zasunutí žebra, který je nebezpečně namáhán. Výsledek analýzy na obrázku 25 vykazuje koncentraci napětí v místě vrubu na otvoru pro žebro. V tomto místě by tak mohlo hrozit nebezpečí šíření lomu a následného porušení. Z tohoto důvodu byl vytvořen rádius 2mm v hranách otvoru na desce. Z obrázku 26 vyplývá, že i přes tuto úpravu geometrie je v kritickém místě napětí v hladině 400Mpa, což je nepřípustné. Tato varianta tedy nebyla dále rozvíjena, byla zamítnuta a pokračovalo se v hledání jiné konstrukce.



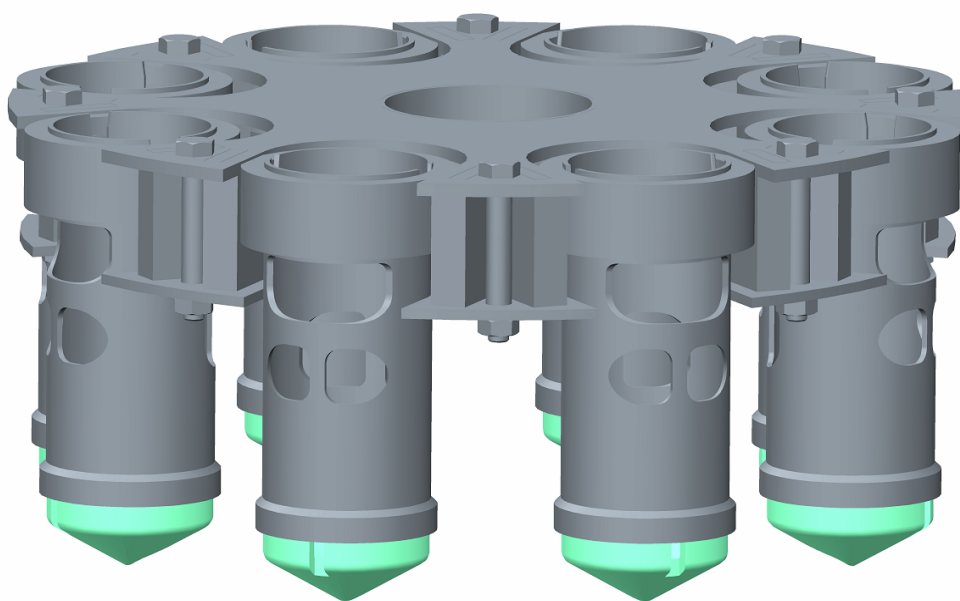
obr. 25 analýza desky 1



obr. 26 analýza desky 2

3.3 Návrh rotoru se svislou polohou kyvet

Varianta rotoru se svislými kyvetami na obr. 27 vychází z konstrukce v kapitole 3.2.1, je téměř shodná, osa otáčení kyvety je taktéž mezi deskami rotoru. Rozdíl je pouze v tom, že na spodní desce jsou vytvořeny větší výřezy, které tak umožňují kyvetě její svislou polohu při nečinnosti rotoru. Výřezy jsou uzpůsobeny tak, aby bylo možné opření kyvety při fázi pootáčení kartuší. Svislá poloha kyvety při pootáčení s sebou přináší nevýhodu v podobě nutnosti modifikace pootáčecího mechanismu, který je u stávajícího prototypu navržen pro konstrukci s kyvetami uloženými pod úhlem 45° od osy rotace. Vršek kyvety vystupuje nad úroveň horní desky, tudíž je možná bezproblémová manipulace s kartuší. Čep na žebro není navržen přímo ve středu desek, jelikož by v tomto případě objímka svojí geometrií narážela do spodní desky, neboť výřez na spodní desce není dostatečně velký. V případě jeho zvětšení by již nebylo možné provést opření kyvety. Důležitým parametrem je poloha těžiště kyvety. Těžiště kyvety by mělo při centrifugaci ležet na kolmici k ose rotace, která prochází osou otáčení kyvety okolo čepu. Tohoto požadavku nelze absolutně dosáhnout z důvodu změny polohy těžiště kartuše vlivem jejího pootáčení mezi jednotlivými fázemi centrifugace. Vzhledem k tomu, že kartuše má výrazně nižší hmotnost než zbytek kyvety, není změna těžiště příliš významná a pohybuje se v řádu desetin milimetru. Nemá tak podstatný vliv na dosažení požadovaného odstředivého zrychlení potřebného pro centrifugaci.

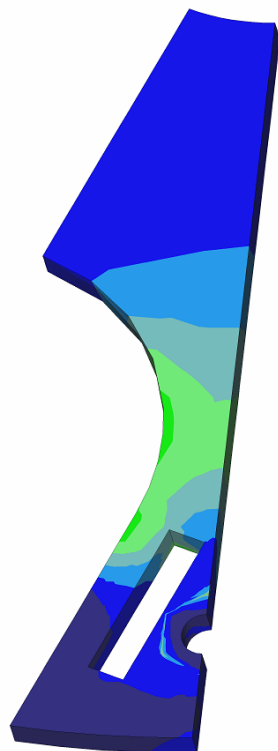


obr. 27 rotor se svislými kyvetami

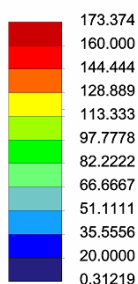
Konstrukce byla také podrobena napěťové analýze a bylo předpokládáno, že jedním ze slabých míst konstrukce bude horní deska stejně jako u předchozího řešení. Tloušťka desky byla zvolena 3 mm. Na obr. 28 je znázorněn výsledek analýzy na horní desce a lze pozorovat, že napětí v nejslabším místě desky dosahuje hodnoty okolo 90 MPa. Toto napětí je z hlediska požadavků na bezpečnost vyhovující. Výřez, potřebný pro zasunutí žebra, nepředstavuje v tomto případě nebezpečí, neboť je oproti předchozí variantě menší a uzavřený.

Velké riziko však představuje čep na žebro. Z napěťové analýzy (obr. 29) vyplývá, že je čep velmi namáhán ohybovým napětím. Při průměru čepu 9 mm je v kritickém místě napětí 216 MPa, což představuje nepřijatelnou hodnotu. Z důvodu tohoto nebezpečného namáhání byla provedena optimalizace čepu. Bylo analyzováno několik průměrů čepu, dokud nebyla nalezena vyhovující hodnota.

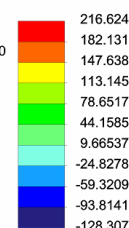
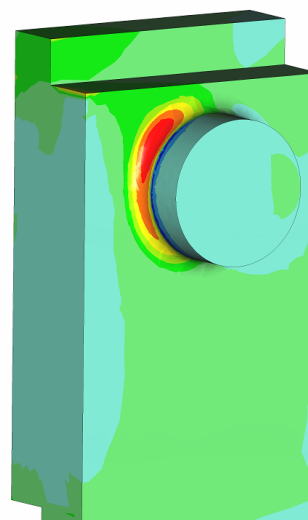
Stress von Mises (WCS)
(MPa)
Location: Components and Layers
Loadset: LoadSet1 : ROTOR_SVISLE Step 2, Time 1.0000E+00



obr. 28 analýza desky

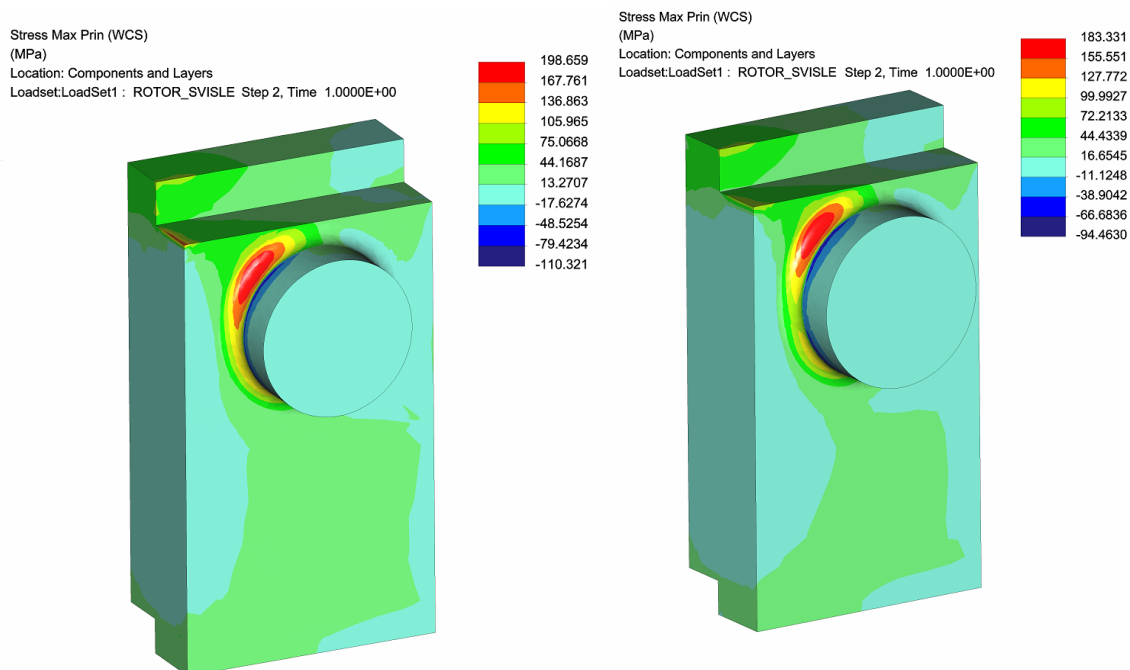


Stress Max Prin (WCS)
(MPa)
Location: Components and Layers
Loadset: LoadSet1 : ROTOR_SVISLE Step 2, Time 1.0000E+00



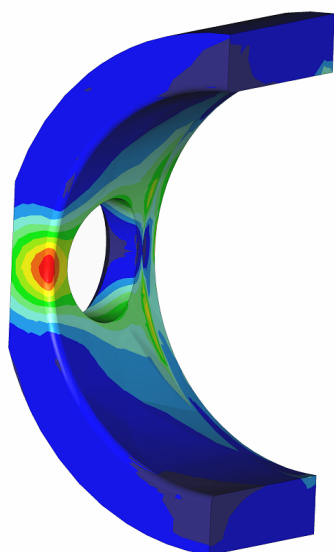
obr. 29 ϕ čepu 9mm

Na obrázcích 30 a 31 jsou výsledky analýzy dvou průměrů čepu. Z obrázků je patrné, že vyhovující hodnota napětí o hodnotě 183MPa bylo dosaženo u čepu o poloměru 11mm. Toto řešení se tedy z tohoto hlediska jeví jako vyhovující a nabízí se prostor pro další

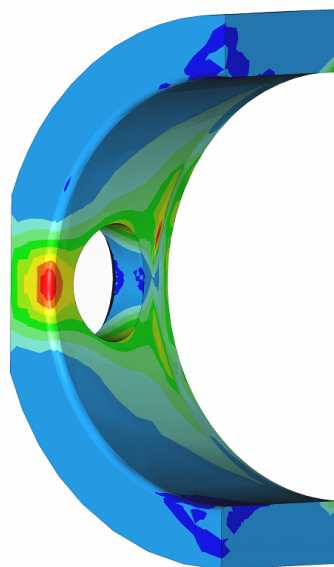
obr. 30 ϕ čepu 10mmobr. 31 ϕ čepu 11mm

zvětšování průměru čepu. Toto však již není možné z důvodu snížení tuhosti objímky kyvety, která se na čepech otáčí. Ukázalo se, že již při velikosti čepu, respektive díry na objímce, o průměru 10mm dochází na stěně objímky k nepříznivému namáhání (obr. 32). Napětí dosahuje hodnoty 198MPa což je nad přípustnou hranicí zajišťující dostatečnou bezpečnost. Vyhovující hodnota napětí byla dosažena v případě díry o průměru 9 mm. Podle obrázku 33 je v kritickém místě napětí 173MPa. Toto řešení je ovšem opět nevyhovující z hlediska namáhání čepu (dle obr. 29). Šířku objímky již nelze více zvětšit, neboť by objímka zasahovala do otvoru v kyvetě, který je určen pro pootáčení, což je nepřijatelné. Tento otvor nelze ani modifikovat, neboť musí respektovat tvar kartuše, který je neměnný. Jedním z možných řešení by bylo použití jiného vhodného materiálu, který by tomuto napětí pevnostně vyhovoval. Další možnost je nalezení jiného konstrukčního řešení, které by tyto nedostatky eliminovalo. Možné řešení je dále popsáno v kapitole 3.4

Stress Max Prin (WCS)
(MPa)
Location: Components and Layers
Loadset: LoadSet1 : ROTOR_SVISLE Step 2, Time 1.0000E+00

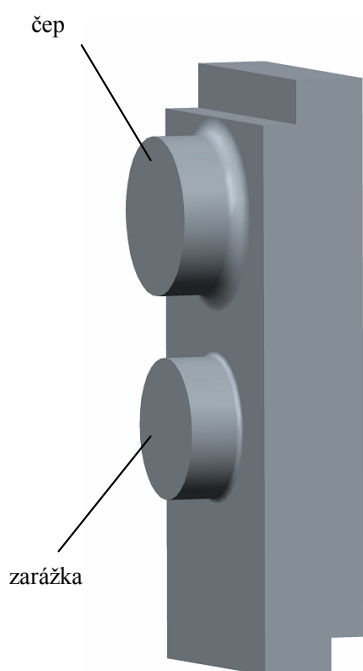
Obr. 32 ϕ díry 10mm

Stress Max Prin (WCS)
(MPa)
Location: Components and Layers
Loadset: LoadSet1 : ROTOR_SVISLE Step 2, Time 1.0000E+00

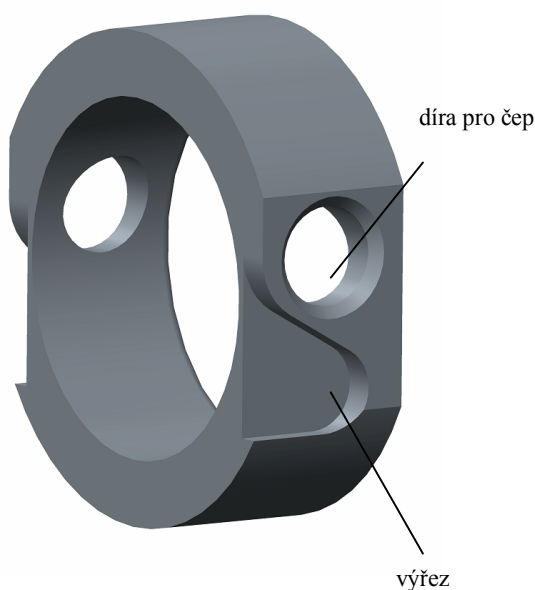
Obr. 33 ϕ díry 9mm

3.4 Modifikace žebra a objímky

Tato varianta představuje upravené řešení předchozí konstrukce, kdy došlo k přidání další geometrie na žebro v podobě válcové zarážky (obr. 34) a k vytvoření vyfrézovaného výřezu na objímce (obr. 35). Po dosažení vodorovné polohy kyvety dojde k zasunutí zarážky na žebro do výřezu na objímce. Tento princip by měl nabídnout snížení napětí jak na otočném čepu, tak na slabé stěně objímky, neboť na zachycení odstředivé síly se podílí i příslušná zarážka. Nutnou podmínkou pro tuto funkci je poloha těžiště, která se musí nacházet mezi čepem a zarážkou. Aby se vyhovělo tomuto požadavku, byla díra pro čep na objímce posunuta o tři milimetry nad osu kyvety. Toto bezpečně zajistí požadovanou polohu těžiště, které tak bude ležet mezi čepem a zarážkou. Díky této úpravě také získáme vodorovnou polohu během centrifugace, neboť nositelka odstředivé síly bude vždy pod osou kyvety a bude tak tvořit moment, který do rovnováhy uvede reakce na zarážce. Optimální poloha těžiště z hlediska snížení namáhání by byla přesně uprostřed mezi čepem a zarážkou, toho však nelze z hlediska ostatní geometrie dosáhnout.



obr. 34 žebro



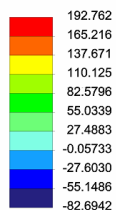
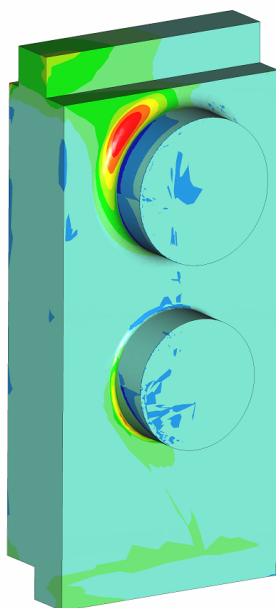
obr. 35 objímka

Pro analýzu byl zvolen průměr čepu 9mm a průměr zarážky 8mm. Z obrázku 36 je patrné, že přidáním zarážky kleslo napětí z 216MPa v původní variantě s devítimilimetrovým čepem na hodnotu 192 MPa.

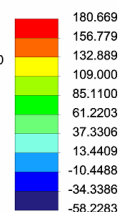
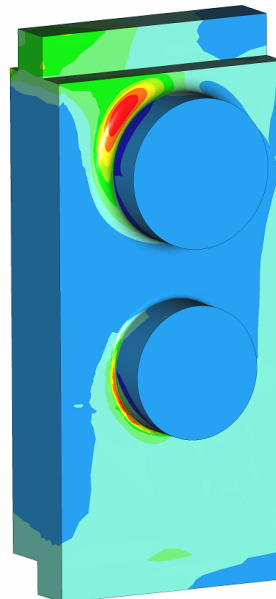
Pro dosažení většího snížení namáhání čepu byla optimalizována poloha osy díry na objímce nad osu kyvety, čímž se změnila poloha těžiště kyvety. Poloha těžiště byla s ohledem na limitující prostor a ostatní geometrii rotoru navržena na maximální možnou vzdálenost 4 mm pod osu kyvety. Na obrázku 37 je výsledek analýzy s čepem o průměru 9 milimetrů a optimalizovaným těžištěm kyvety. Je patrné, že díky změně těžiště kleslo napětí na hodnotu 180MPa, což je již vyhovující hodnota. Dále bylo provedeno zvýšení tuhosti samotného žebra, což (dle obr. 38) vedlo k dalšímu snížení napětí v kritickém místě, konkrétně na hodnotu 171MPa.

Porovnáním tedy lze dokázat, že důsledkem doplnění žebra o zarážku došlo ke snížení napětí o hodnotu 45MPa při stejném průměru čepu. Namáhání slabého místa objímky znázorňuje obrázek 39. Napětí v kritickém místě se pohybuje v hladině 120MPa, z čehož je patrné, že i zde došlo k výraznému snížení oproti variantě bez zarážky, kdy v těchto místech bylo napětí 170MPa. Tato modifikace tedy byla použita do finální konstrukce rotoru.

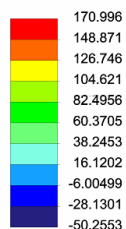
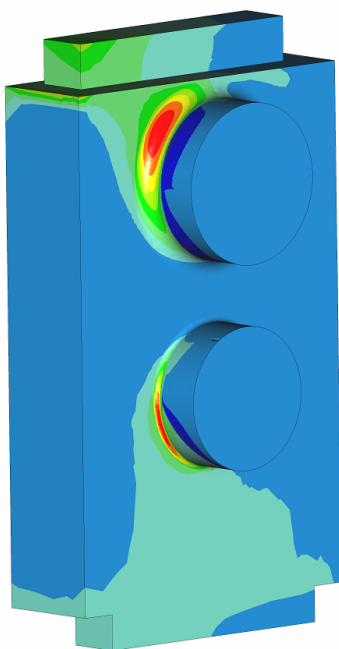
Stress Max Prin (WCS)
(MPa)
Location: Components and Layers
Loadset: LoadSet1 : ROTORSV3_UPRAVENY Step 2, Time 1.0000E+00



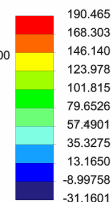
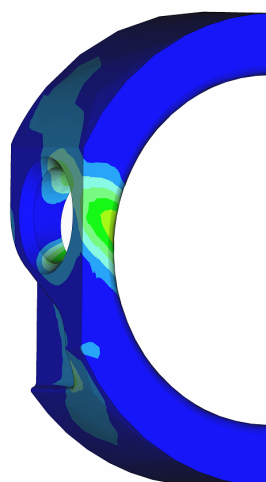
Stress Max Prin (WCS)
(MPa)
Location: Components and Layers
Loadset: LoadSet1 : ROTORSV3_UPRAVENY Step 2, Time 1.0000E+00

obr. 36 ϕ čepu 9mmobr. 37 ϕ čepu 9mm,
optimalizované těžiště kyvety

Stress Max Prin (WCS)
(MPa)
Location: Components and Layers
Loadset: LoadSet1 : ROTORSV3_UPRAVENY Step 2, Time 1.0000E+00



Stress Max Prin (WCS)
(MPa)
Location: Components and Layers
Loadset: LoadSet1 : ROTORSV3_UPRAVENY Step 2, Time 1.0000E+00



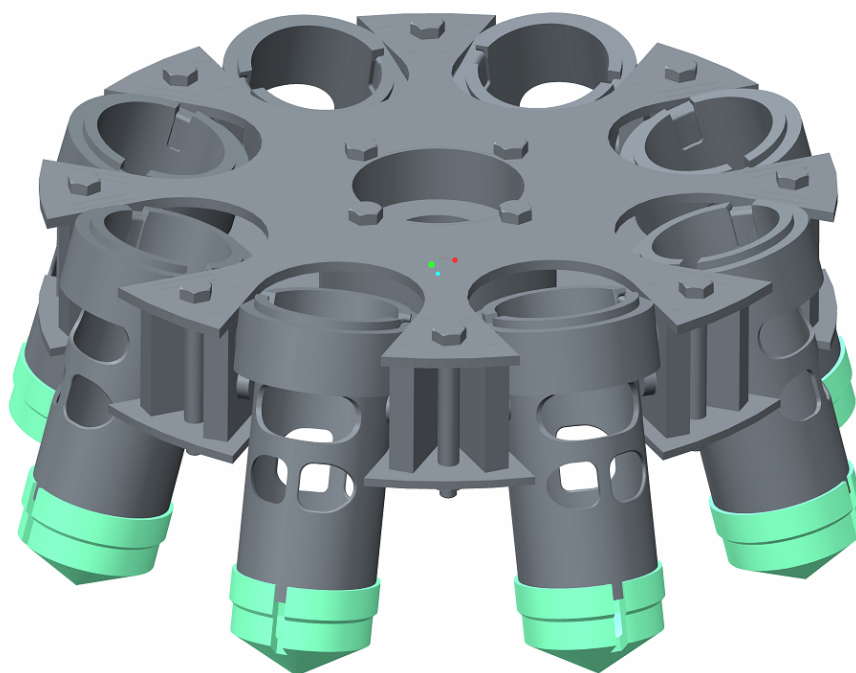
obr. 38 tužší žebro

obr. 39 napětí na objímce

3.5 Finální konstrukce rotoru

Finální konstrukce rotoru (obr. 40) vychází z návrhu konstrukce rotoru se svislými kyvetami (kap. 3.3), byly u ní však provedeny částečné změny. Využívá modifikovaného žebra a modifikované objímky (kapitola 3.4). Byla doplněna o 4 šrouby M4, které spojují horní a spodní desku s nábojem rotoru. Náboj byl také upraven a to z důvodu, aby bylo možné do něj vsunout svěrné pouzdro, pomocí kterého bude rotor upevněn na hřídeli servopohonu.

Jak je patrné z obrázku 40, nastala změna v klidové poloze kyvety. V důsledku posunutí těžiště, nedosáhne kyveta přesně svislé polohy, neboť gravitační síla tvoří k čepu moment a vychyluje tak kyvetu od osy otáčení rotoru o hodnotu $12,5^\circ$. Pro počáteční polohu byl tedy zvolen úhel mezi osou kyvety a osou rotace o velikosti 15° . Tato poloha bezpečně zajišťuje možnost opření kyvety pro pootáčení. Podle toho byl také modifikován výřez na spodní desce, o kterou se kyveta opírá. Bude tedy nutné modifikovat otáčecí mechanismus pro tuto polohu kyvety.



obr. 40 finální konstrukce

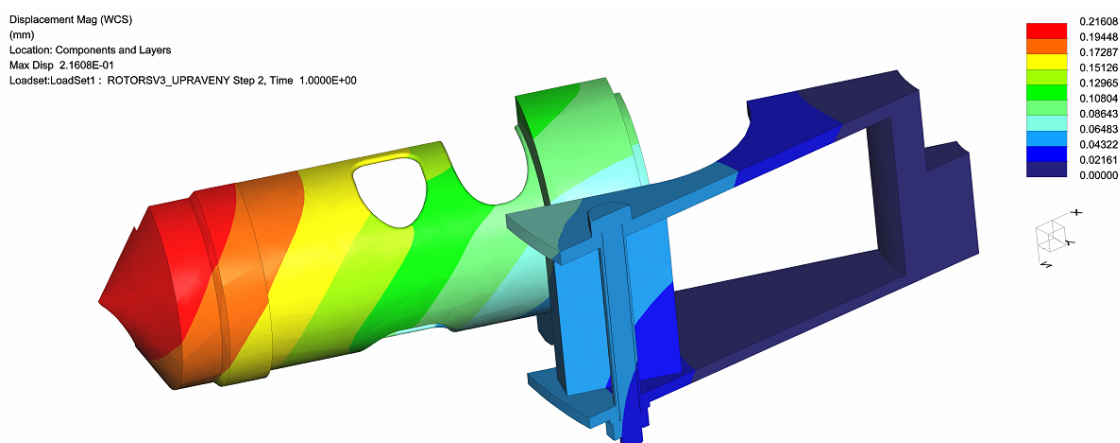
3.5.2 Analýza horní desky

Na finální konstrukci bylo dále nutné provést citlivostní pevnostní analýzu horní desky. U desky byl upraven otvor pro vložení žebra zaoblením ostrých hran za účelem eliminace projevu koncentrace vrubového napětí a také z hlediska výroby. K tomuto bylo také upraveno samotné žebro.

Postupně byla testována deska o různých tloušťkách. Na obrázku 42 (str. 36) jsou znázorněny výsledky ze čtyř analýz, kdy byla tloušťka desky měněna od 1.5mm do 3mm. Všechny tyto varianty se z hlediska maximálního dovoleného napětí jeví jako vyhovující. Vybrána byla tloušťka 3mm, aby byla zajištěná dostatečná tuhost desky pro smontování celé konstrukce rotoru.

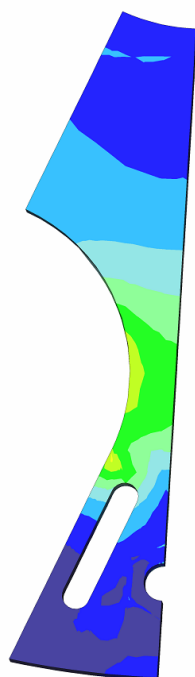
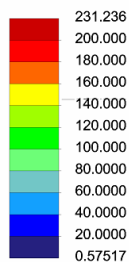
3.5.1 Deformační analýza

Za účelem zjištění maximálních posuvů, byla na finální verzi rotoru provedena deformační analýza. Podle obrázku 41 je maximální posunutí na rotoru 0.21 milimetru. Tato hodnota nepředstavuje pro konstrukci žádné riziko.



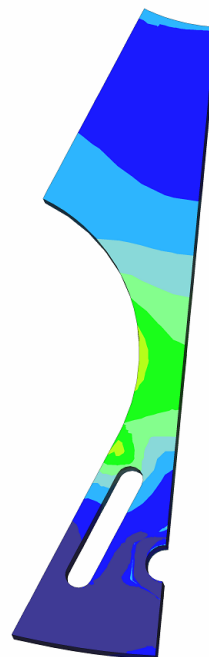
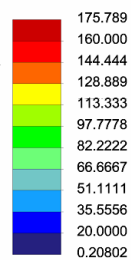
obr. 41 posunutí

Stress von Mises (WCS)
(MPa)
Location: Components and Layers
Loadset:LoadSet1 : ROTORSV3_UPRAVENY



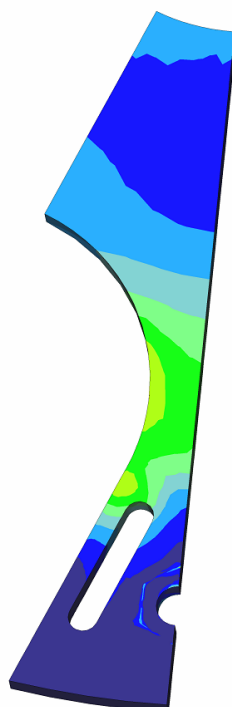
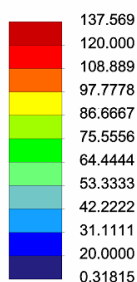
1.5 mm

Stress von Mises (WCS)
(MPa)
Location: Components and Layers
Loadset:LoadSet1 : ROTORSV3_UPRAVENY



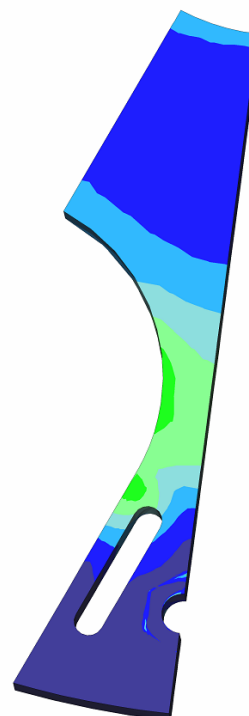
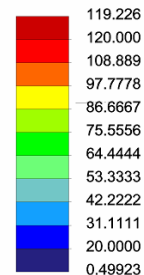
2 mm

Stress von Mises (WCS)
(MPa)
Location: Components and Layers
Loadset:LoadSet1 : ROTORSV3_UPRAVENY



2.5 mm

Stress von Mises (WCS)
(MPa)
Location: Components and Layers
Loadset:LoadSet1 : ROTORSV3_UPRAVENY



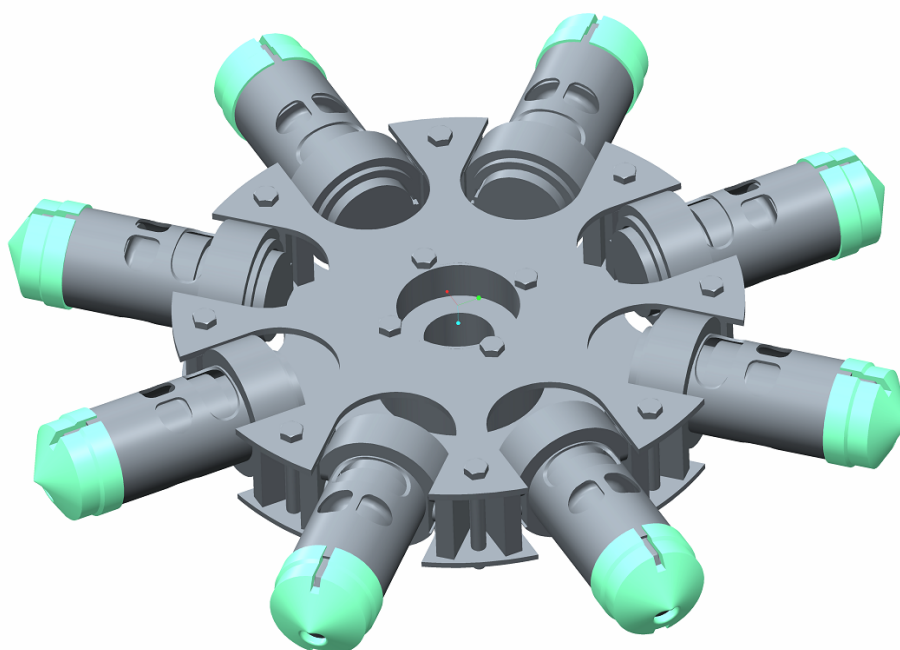
3 mm

obr. 42 citlivostní analýza desky

4 Modální analýza

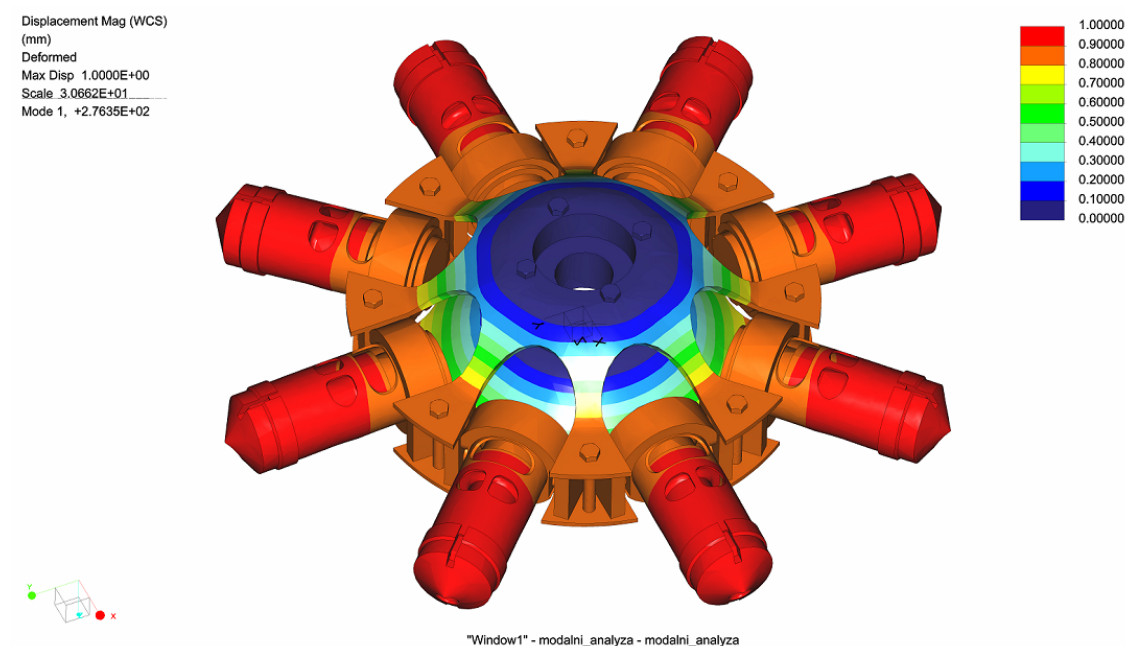
Software Pro/Mechanika nabízí řešení jak statických, tak dynamických analýz. Jednou z nich je modální analýza, která slouží k získání vlastních frekvencí a vlastních tvarů konstrukce. Vlastní frekvence závisí na tuhosti a hmotnosti tělesa či soustavy. Zjištění vlastních frekvencí je pro provoz rotoru velmi důležité, neboť v případě jeho buzení otáčkami, které budou blízké některé z vlastních frekvencí, by docházelo k rezonanci, což by mělo za následek neúměrné zvyšování amplitudy výchylky a hrozilo by riziko porušení konstrukce.

Pro konkrétní výpočet byla zvolena finální varianta rotoru, u které byly kyvety namodelovány do vodorovného směru, což odpovídá poloze při provozu centrifugy (obr. 43). Byly přidány zjednodušené rozměrově odpovídající tvary kartuše, kterým byly importovány hmotové parametry skutečných kartuší. Model byl uložen v místě, kde je spojen s hřídelem servomotoru, který rotor pohání.



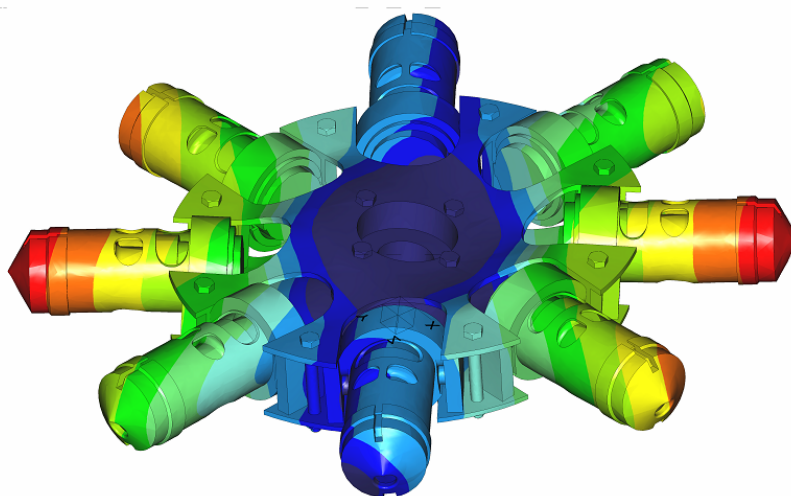
obr. 43 výpočtový model

Rotor pracuje na otáčkách v rozmezí od 0 do 5000 otáček za minutu, což odpovídá frekvenčnímu rozsahu 0 – 83Hz. V tomto pásmu by se tedy neměly vlastní frekvence rotoru pohybovat. Výsledek modální analýzy na obrázku 44 ukazuje první vlastní frekvenci a vlastní tvar. Jedná se o axiální mod. Tato frekvence nabývá hodnoty 276Hz. Další vlastní frekvence nabývají hodnot 428Hz (ohybový mod obr. 45) a 761Hz (torzní mod obr. 46). Modální analýza prokázala, že všechny vlastní frekvence jsou bezpečně vzdáleny od rozsahu, na kterém rotor pracuje. Z toho lze usoudit, že je možno provozovat rotor na požadovaných otáčkách, aniž by hrozilo riziko vzniku rezonancí.



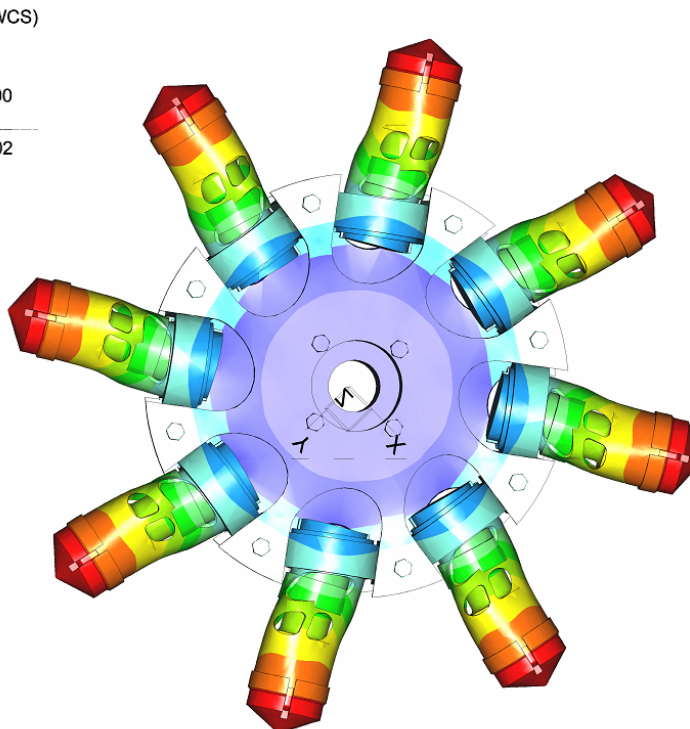
obr. 44 axiální mod

Displacement Mag (WCS)
(mm)
Deformed
Max Disp 1.0000E+00
Scale 3.0662E+01
Mode 2, +4.2845E+02



Obr 45 ohybový mod

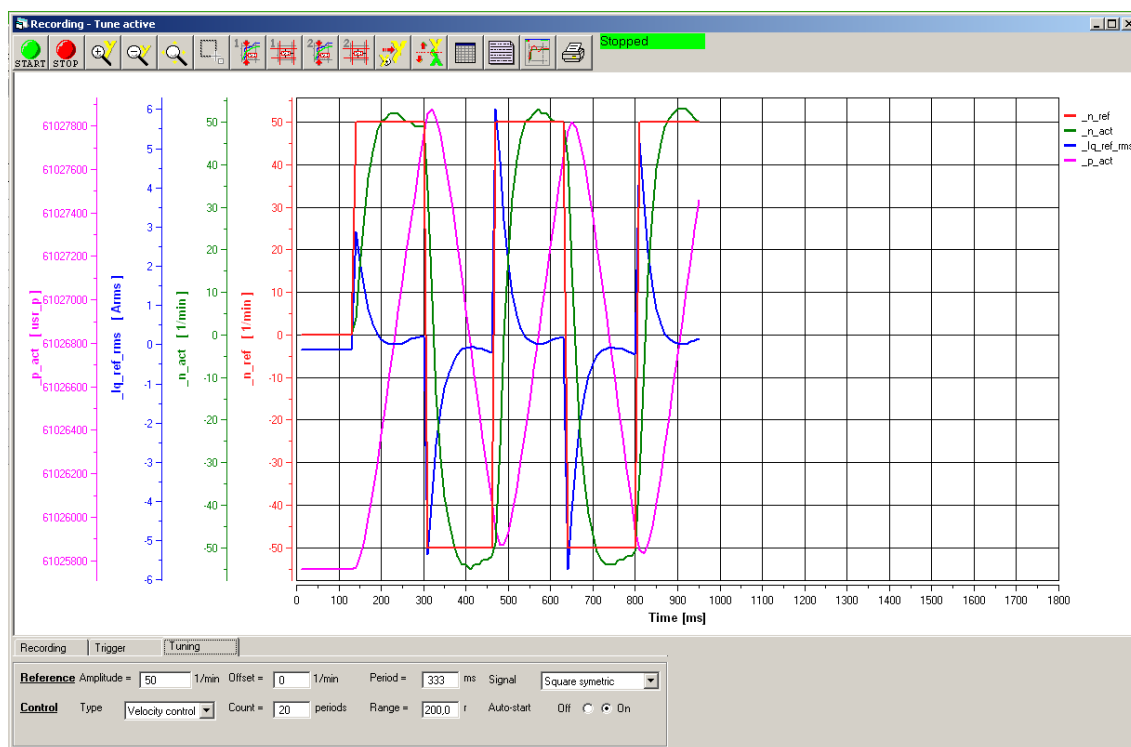
Displacement Mag (WCS)
(mm)
Deformed
Max Disp 1.0000E+00
Scale 3.0662E+01
Mode 4, +7.6176E+02



obr. 46 torzní mod

5 Návrh svěrného pouzdra

Rotor bude na hřídel servomotoru upevněn pomocí samostředícího svěrného pouzdra. Toto spojení zajišťuje spolehlivé středění, aby bylo možné rotor efektivně vyvážit za účelem eliminace vibrací za provozu přístroje. Hlavním kritériem pro návrh svěrného pouzdra je zatěžující krouticí moment, který vzniká vlivem setrvačných účinků na rotoru. Pro toto je charakteristický moment setrvačnosti k ose rotace rotoru, který byl zjištěn pomocí výpočtového softwaru a nabývá hodnoty $I = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. K určení zatěžujícího momentu je dále nutné určit maximální úhlové zrychlení rotoru během jeho provozu. Největší zrychlení nastává ve fázi pracovního cyklu centrifugy, kdy dohází během rotace současně k periodické změně otáček rotoru za účelem promíchání tekutin ve vzorku. Jedná se o pohyb s amplitudou 50 otáček za minutu a periodou 333ms. Záznam je zobrazen na obrázku 47. Červená křivka znázorňuje průběh otáček, na který je motor buzen řídicí elektronikou. Zelená křivka zobrazuje skutečný, naměřený průběh otáček v závislosti na čase. Z grafu byly odečteny potřebné hodnoty, z nichž bylo vypočítáno maximální úhlové zrychlení, viz výpočet 5.2.



obr. 47 záznam měření otáček

Hodnoty odečtené z grafuamplituda otáček $n = 50 \text{ min}^{-1}$ doba náběhu $t = 30 \text{ ms}$ **Výpočet momentu**

$$\text{amplituda úhlové rychlosti} \quad \omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{2\pi \cdot 50}{60} = 5,23 \text{ s}^{-1} \quad (5.1)$$

$$\text{úhlové zrychlení} \quad \alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{5,23}{0,030} = 174,3 \text{ s}^{-2} \quad (5.2)$$

$$\text{moment setrvačnosti} \quad I = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{zatěžující krouticí moment} \quad M = I \cdot \alpha = 4,9 \cdot 10^{-3} \cdot 174,3 = 0,85 \text{ Nm} \quad (5.3)$$

Podle výpočtu 4.3 nabývá zatěžující krouticí moment hodnoty 0,85 Nm. Pro upevnění rotoru na hřídeli servomotoru, který má průměr 14mm, bylo vybráno pouzdro TLK 110 14x23. Podle údajů v katalogu výrobce, viz [8, str. 184], je toto pouzdro schopné přenést krouticí moment o maximální hodnotě 68Nm, což zajišťuje dostatečné naddimenzování svěrného spoje.

Výpočet minimálního průměru náboje

$$DM \geq D \times K \quad (5.4) \quad [8]$$

$$K = \sqrt{\frac{\sigma_{02} + (C \times Pn)}{\sigma_{02} - (C \times Pn)}} = \sqrt{\frac{290 + (0,6 \times 80)}{290 - (0,6 \times 80)}} = 1,18 \quad (5.5) \quad [8]$$

$$\text{Vypočtený minimální průměr:} \quad \underline{DM = 23 \times 1,18 = 27,18 \text{ mm}}$$

Průměr náboje má z konstrukčních důvodů velikost 58 milimetrů, což plně odpovídá požadavku na průměr minimální.

D Vnitřní průměr náboje

σ_{02} Mez průtažnosti materiálu

C faktor odpovídající tvaru a šířce náboje [8]

Pn tlak na náboji [8]

6. Získané odstředivé zrychlení

Základním požadavkem konstrukce bylo dosažení maximálního účinku odstředivého zrychlení v určitém místě kartuše, respektive zvýšení odstředivého zrychlení oproti stávajícímu prototypu rotoru se šikmo uloženými kyvetami. U stávajícího prototypu je místo na kartuši vzdálené 114 milimetrů od osy rotoru a kartuše je pod úhlem 45° . Z výpočtu 6.2 vychází, že zrychlení u stávajícího prototypu (a_1) dosahuje hodnoty 2247g. U nově navržené konstrukce je místo na kartuši vzdálené od osy rotace 125 milimetrů a kartuše je během centrifugace ve vodorovné poloze, což odpovídá úhlu 90° od osy rotace. Výpočtem 6.3 bylo tedy zjištěno, že zrychlení (a_2) dosahuje hodnoty 3485g, což dle výpočtu 6.4 představuje zvýšení účinku odstředivé síly na centrifugaci o 55 %. Na tomto zvýšení se taktéž, v důsledku dosažení vodorovné polohy, podílí zvětšení poloměru, na kterém odstředivá síla působí.

Úhlová rychlost

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{2\pi \cdot 5000}{60} = 523,6 \text{ s}^{-1} \quad (6.1)$$

Zrychlení u stávající konstrukce

$$a_1 = \omega^2 \cdot r \cdot \sin(45^\circ) = 523,6^2 \cdot 0,114 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 22049 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 2247 \text{ g} \quad (6.2)$$

Zrychlení u nové konstrukce

$$a_2 = \omega^2 \cdot r \cdot \sin(90^\circ) = 523,6^2 \cdot 0,125 \cdot 1 = 34191 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 3485 \text{ g} \quad (6.3)$$

Procentuální rozdíl

$$\Delta \% = \frac{a_2 \cdot 100}{a_1} - 100 = \frac{34191 \cdot 100}{22049} - 100 = 55 \% \quad (6.4)$$

Závěr

Úkolem bakalářské práce bylo navrhnout rotor s výkyvnými kyvetami pro laboratorní centrifugu, který pevnostně vyhovuje vysokému zatížení odstředivými silami. Bylo navrženo několik variant konstrukčního řešení rotoru. Jednotlivé varianty byly analyzovány pomocí softwaru Pro/Mechanika. Vybraná varianta byla optimalizována s cílem minimalizace namáhání v kritických místech konstrukce, zejména otočného čepu kyvety. Optimalizace se týkala modifikací žebra, průměru otočného čepu a polohy těžiště kyvety.

Bylo navrženo originální řešení pro zachycení odstředivých sil kyvety pomocí doplnění konstrukce o zarážku, která se na zachycení odstředivé síly podílí a současně se podílí na zajištění vodorovné polohy, kdy je maximální účinek centrifugace. Dále byla provedena citlivostní pevnostní analýza horní desky rotoru za účelem dosažení dostatečné tuhosti a snížení namáhání.

Závěrem návrhu byla provedena modální analýza konečné konstrukce, která specifikovala vlastní frekvence rotoru a vedla ke zjištění, že vlastní frekvence rotoru jsou mimo rozsah frekvencí, kterými je rotor buzen. Díky tomu nehrozí riziko vzniku rezonancí a je tak zajištěn jeho bezpečný provoz. Bylo také navrženo uložení rotoru na hřídeli servopohonu pomocí samostředicího svěrného pouzdra.

Navržená konstrukce nabízí stoprocentní využití účinku odstředivé síly potřebné pro centrifugaci. Doprovodným účinkem, v důsledku uvedení kyvety do vodorovné polohy, bylo zvětšení poloměru místa na kartuši, kde dochází k centrifugaci vzorku, což se také projevilo na výsledném zrychlení. Výsledné odstředivé zrychlení v určeném místě kyvety dosahuje hodnoty 3485g, což představuje zvýšení účinku odstředivé síly o 55 % oproti stávající konstrukci rotoru.

Pro finální návrh byla zpracována výrobní dokumentace.

Použité zdroje

- [1] 5hod centrifugace.pdf
<http://www.umbr.cas.cz/~vacha/Vyuka/Metody/5hod%20Centrifugace.pdf>
- [2] Izolace bunek a funkční testy lymfocytů.pdf
http://imunologie.lf2.cuni.cz/soubory_vyuka/Izolace%20bunek%20a%20funkcni%20testy%20lymfocytu.pdf
- [3] 2_prednaska2012.pdf
http://biomikro.vscht.cz/vyuka/ib/2_prednaska2012.pdf
- [4] pt_centrifugace_elfo_2011.pdf
http://www.lf3.cuni.cz/opencms/export/sites/www.lf3.cuni.cz/cs/pracoviste/chemie/vyuka/studijni-materialy/CSFBXX41C/prokruhy/pt_centrifugace_elfo_2011.pdf
- [5] nomocentrif.pdf
<http://aquaticpath.umd.edu/nomogram.html>
- [6] Konstrukce laboratorního přístroje pro molekulární diagnostiku / Petr Grimm
Katedra textilních a jednoúčelových strojů - Bakalářská práce KTSB030
- [7] elutriator
http://www.nature.com/nprot/journal/v3/n4/fig_tab/nprot.2008.34_F2.html
- [8] sverna pouzdra.pdf
http://www.teatechnik.cz/download.php?file=doc/katalogy/sverna_pouzdra.pdf

Seznam příloh

Výkresová dokumentace

B067/0.2	výkres sestavy rotoru
B067/0-1.4	výkres náboje
B067/0-2.3	výkres spodní desky
B067/0-3.3	výkres horní desky
B067/0-4.3	výkres žebra
B067/0-5.3	výkres rozpěrky
B067/0-6.3	výkres objímky